



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Untersuchungen über das Verhalten von Druckfarbe im Spalt zweier Farbwerkswalzen

Glück, Michael

(1979)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00014029>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Report

Division: 16 Department of Mechanical Engineering
16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14029>

Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
der Technischen Hochschule Darmstadt

Institutsdirektor: Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter

Untersuchungen über das Verhalten von Druckfarbe im Spalt zweier Farbwerkswalzen

von

Dr.-Ing. Michael Glück

Darmstadt 1979

Institutsbericht 2/1979

Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
der Technischen Hochschule Darmstadt

Institutsdirektor: Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter

Untersuchungen über das Verhalten von
Druckfarbe im Spalt zweier Farbwerkswalzen

von

Dr.-Ing. Michael Glück

Institutsbericht 2/1979

Der vorliegende Bericht schließt das Forschungsvorhaben AIF Nr. 3353 und 3886 (Fortsetzung) ab, das unter dem Titel "Das Verhalten von Druckfarben in Walzenspalten von Druckmaschinen" stand. Das Vorhaben wurde im Jan. 1975 begonnen und im Dez. 1977 beendet.

Die Arbeiten standen unter der Leitung von Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter und wurden am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Hochschule Darmstadt durchgeführt. Sachbearbeiter war Dipl.-Phys. G. Klein, welcher alle Messungen durchgeführt hat. Die Auswertung wurde von Dr.-Ing. M. Glück, der seinerzeit auch die Vorarbeiten geleistet hat, vorgenommen.

Finanzieller Träger des Forschungsvorhabens war die Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. mit Zuwendungen des Bundeswirtschaftsministeriums über die AIF (Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen).

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
0. Verzeichnis der wichtigsten Symbole	VII
1. EINFÜHRUNG	1
1.1 Aufbau und Funktion eines Walzenfarbwerks	1
1.2 Bestehende Vorstellungen über die Vorgänge in einem Walzenspalt	3
1.3 Bedeutung und Zielsetzung des Vorhabens	6
2. DER VERSUCHSSTAND	11
2.1 Der mechanische Aufbau	11
2.2 Die Meßtechnik für die zu erfassenden mechanischen Größen	16
2.3 Die Farbschichtdicken-Meßeinrichtung	21
2.4 Die Temperaturmessung	35
2.5 Die Optik für die photoanalytischen Untersuchungen	35
3. PHOTOANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN	39
3.1 Optische Grundlagen der Lichtreflexion	39
3.2 Lichtreflexion im Walzenspalt	42
3.3 Auswahl und Charakterisierung der einge- setzten Druckfarbe	51
3.4 Durchführung und Ergebnisse der photo- analytischen Untersuchungen	53

	Seite
4. MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN DES ROLL- VERHALTENS	75
4.1 Der Schlupf und seine Bedeutung	76
4.2 Einführende Betrachtungen	83
4.3 Die Versuchsflüssigkeiten	88
4.4 Ergebnisse der Druckkraftmessungen	95
4.5 Theoretische Ansätze zu den Schlupf- messungen	99
4.6 Schlupfmessungen an trockenen Walzen	102
4.7 Schlupfmessungen mit Ölen	105
4.8 Messungen mit zusätzlichem Bremsmoment	118
4.9 Schlupfmessungen mit Druckfarbe	121
4.10 Der Einfluß der Schichtdicke bei den Messungen mit Druckfarbe	132
5. ZUSAMMENFASSUNG	139
6. LITERATURVERZEICHNIS	141

0. VERZEICHNIS DER WICHTIGSTEN SYMBOLE

- a - Druckzonenbreite
- A - Fläche
- b - Beistellung
- h - Schichtdicke
- H - Spalthöhe
- I - Intensität
- L - Länge der Walzen
Gummiwalze L = 68 mm
Glaswalze L = 100 mm
- M - Drehmoment
- M_R - Rollmoment
- M_B - von außen aufgebrachtes Bremsmoment
- n - Drehzahl
- P - Druckkraft
- r - Radius
Index v: viskoelastische Walze 35 mm
Index g: Glaswalze 76 mm
- s - Schlupf
- t - Zeit
- T - Tangentialkraft

- u - Strömungsgeschwindigkeit
- v - Umfangsgeschwindigkeit
- x - Koordinate in Richtung Spalthöhe
- z - Koordinate in Richtung Spaltlänge
- λ - Wellenlänge
- ϑ - Temperatur
- σ - spektrale Empfindlichkeit
- Φ - Detektorsignal
- η - Viskosität

1. E I N F Ü H R U N G

1.1 Aufbau und Funktion eines Walzenfarbwerkes

In einer Druckmaschine stellt ein Farbwerk ein sehr wesentliches Aggregat dar. Dieses ist bei Hoch- und Flachdruckmaschinen stets als Walzenfarbwerk ausgelegt. Es hat die Aufgabe, die Druckfarbe von einem Farbreservoir - dem Farbkasten - zur eigentlichen Druckeinheit der Maschine zu fördern. Hierbei sollen die farbführenden Flächen der Druckform eine Farbschicht konstanter Dicke in der Größenordnung $1\text{ }\mu\text{m}$ erhalten. Um ein entsprechend den Qualitätsansprüchen zufriedenstellendes Druckbild auf dem Bedruckstoff zu erreichen, muß die auf die Druckform zu übertragende Farbschicht bezüglich Dicke und Konsistenz hinreichend gleichmäßig sein. Insbesondere sollen in dieser Schicht keine Unterschiede als Folge von Einflüssen vorliegen, die durch die Art der Farbzuführung oder durch die Prozesse des Farbtransportes und der sog. Farbverreibung im Farbwerk oder durch Rückwirkungen von der Druckform hervorgerufen werden.

Um eine gute Einfärbequalität auf der Druckform zu erreichen, ist ein Farbwerk recht umfangreich mit Walzen ausgelegt. Farbwerke mit mehr als zwanzig Walzen sind keine Seltenheit, insbesondere bei Bogen-Rotationsmaschinen^{*)}. Sie bestehen aus Stahl- und Gummiwalzen, die abwechselnd angeordnet sind und unterschiedliche Durchmesser besitzen. Bei Betrieb rollen diese Walzen wechselseitig aufeinander ab, wobei die

^{*)} Lediglich bei Maschinen für den Flexodruck, einem speziellen Hochdruckverfahren, ist die Anzahl der Walzen im Farbwerk meist auf zwei beschränkt. Hier werden jedoch Druckfarben mit im Vergleich zu den sonstigen Hochdruck- und Flachdruckverfahren recht niedrigen Viskositäten eingesetzt. Deshalb werden in die weitere Betrachtung Flexodruckmaschinen nicht mit einbezogen.

Stahlwalzen im allgemeinen über ein Zahnradgetriebe angetrieben, die gegen diese angedrückten Gummiwalzen aber nur durch Friktion mitgenommen werden.

Als Gummiwalze sei hier - in Übereinstimmung mit der üblichen Bezeichnung in der Fachsprache - eine Walze bezeichnet, die aus einem zylindrischen Stahlkern besteht und mit einem elastomeren Belagmaterial bezogen ist. Dieses Belagmaterial kann als weitgehend inkompressibel angesehen werden und bei verschiedenen Gummiwalzen unterschiedliche Stärke besitzen.

Die hartelastische Walze wird im allgemeinen aus Stahl gefertigt. Lediglich in Farbwerken für Offsetmaschinen sind diese Maschinen mit einem gut 1 mm dicken Kunststoffbelag aus Polyamid 11 (Markenname: Rilsan) versehen oder aber verkupfert. Diese Oberflächenbeschichtungen der Stahlwalze haben in erster Linie eine reine Korrosionsschutzfunktion, da beim Offsetdruck infolge der Zuführung von in der Regel leicht angesäuertem Wasser (pH-Wert ca. 4 bis 6) auf die Druckplatte dieses Wasser zu einem gewissen Teil unvermeidlich auch in das Farbwerk gelangt. Gegenüber dem elastomeren Belag einer Gummiwalze sind diese Korrosionsschutzbeschichtungen hartelastisch, so daß die Stahlwalze mit oder ohne solche Beschichtungen gegenüber einem Gummiwalzenbelag stets als starr angesehen werden kann.

Die Farbwerke werden im allgemeinen mit Druckfarbe beschickt, die hochviskos und thixotrop ist und eine scheinbare Viskosität von etwa 2 Pas bis 100 Pas (entsprechend 20 Poise bis 1000 Poise) besitzt. Um die Druckform an den farbführenden Stellen hinreichend gleichmäßig einfärben zu können, soll das Farbwerk die Farbe von ihrem rheologischen Anfangszustand durch Scherung in den Druckzonen und fortlaufende Spaltung zwischen den rotierenden Walzen in einen niedriger viskosen, fließfähigen Film transformieren.

1.2 Bestehende Vorstellungen über die Vorgänge in einem Walzenspalt

Die in einem Walzenfarbwerk zu bewirkende rheologische Zustandsänderung einer Druckfarbe ist allgemein mit einer Zerstörung der bei ihrer Zuführung in das Farbwerk vorliegenden Farbstruktur verknüpft. Hierbei soll nach vorwiegender Auffassung die Druckfarbe in den Walzenspalten großen Schergefällen ausgesetzt sein, für die Werte in der Größenordnung von 10^4 s^{-1} bis 10^6 s^{-1} genannt werden /1-6/. VOET /7/ schätzte die Scherbeanspruchung im Walzenspalt zu etwa 10^6 Pa (10 kp/cm^2) ab. Auf Werte in diesen Größenordnungen für die beiden genannten Größen wird auch noch in neueren und neuesten Arbeiten /8, 9/ hingewiesen.

Entsprechende Werte für das Schergefälle lassen sich auch theoretischen Untersuchungen über das Verhalten von Druckfarbe und anderen Flüssigkeiten in Walzenspalten entnehmen. Derartige Untersuchungen basieren stets auf der hydrodynamischen Schmierfilmtheorie /10, 11/ bei starrer, zylinderförmiger Walzengeometrie und sehr kleiner Spalthöhe. Sie beschränken sich im allgemeinen auf den Bereich des Einlaufens in den Walzenspalt und auf diesen selbst, schließen jedoch den Bereich der Farbfadenbildung am Ausgang des Walzenspaltes aus.

Im Rahmen einer solchen Untersuchung weist MILL /12/ darauf hin, daß aufgrund der von ihm ermittelten Druckverteilung in einem Walzenspalt die Druckfarbe mit einer Geschwindigkeit durch den Spalt fließt, die über der der beiden Walzenoberflächen liegt. BANKS und MILL /13/ haben in ähnlichen Betrachtungen für vollständig eingetauchte Walzen gefunden, daß die mittlere Geschwindigkeit, mit der eine Flüssigkeit durch den Walzenspalt strömt, $4/3$ der mittleren Walzenoberflächengeschwindigkeit beträgt. Bei Annahme einer Farbschichtdicke in der Größenordnung 10^{-5} m und Walzengeschwindigkeiten von 1 m/s bis 10 m/s legen die Ergebnisse dieser Untersuchungen

somit ebenfalls Schergefälle von 10^4s^{-1} bis 10^6s^{-1} nahe. Tatsächlich weist MILL in einer späteren Arbeit /3/ ausdrücklich auf Werte für das Schergefälle in der Größenordnung 10^5s^{-1} hin.

Die erwähnten Untersuchungen von MILL wurden unter der Annahme ausgeführt, daß die Druckfarbe ein Newtonsches Fließverhalten besitzt. Zur Berücksichtigung des allgemein nicht-newtonschen Verhaltens von Druckfarben ziehen TANNER /14/, MITCHELL /15/, HELLINCKX und MEWIS /5/ sowie DECKER /16, 17/ ein viskoelastisches Verhalten der Druckfarbe im Walzenspalt in Betracht. Die rheologische Stoffgleichung für die Druckfarbe entspricht hierbei jeweils dem einer Maxwell-Flüssigkeit. Einer solchen Flüssigkeit wird neben viskosen Eigenschaften auch ein elastisches Verhalten zugeschrieben. Dabei wurde von den genannten Autoren für den viskosen Anteil in der Zustandsgleichung eine vom Schergefälle unabhängige Viskosität oder aber eine durch eine Potenzfunktion zu beschreibende Viskosität angenommen.

Ein interessantes Ergebnis dieser theoretischen Untersuchungen ist, daß bei Beschickung zweier Walzen mit einer Maxwell-Flüssigkeit die Druckverteilung zwischen den beiden Walzen qualitativ ähnlich der Beschickung mit einer newtonschen Flüssigkeit ist, aber durchweg etwas kleinere Werte besitzt. Aber auch hier stehen durch die Ansätze aus der elasto-hydrodynamischen Theorie, wie im Falle newtonscher Flüssigkeiten, die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im Walzenspalt - und damit auch das dort vorliegende Schergefälle - sowie die Spaltgeometrie miteinander in Beziehung. Diese Beziehung wird im wesentlichen von der jedesmal zugrunde gelegten hydrodynamischen Schmierfilmtheorie geprägt und lediglich durch die unterschiedlichen Stoffgleichungen für die Flüssigkeiten modifiziert. So erhält TANNER /14/ für das Schergefälle in einem mit einer Maxwell-Flüssigkeit gefüllten Spalt einen analytischen Ausdruck, der sich von dem für mit einer newtonschen Flüssigkeit gefüllten Spalt um einen Faktor

unterscheidet, dessen Größe zwar von den rheologischen Eigenschaften der Maxwell-Flüssigkeit abhängt, der aber mit Sicherheit größer als 1 angenommen werden kann.

Man kann somit folgern, daß das Schergefälle in einem Spalt sehr kleiner Höhe zwischen zwei Walzen nach Aussage der theoretischen Untersuchungen nicht wesentlich durch die Art der Flüssigkeit beeinflusst wird, gleichgültig ob dieser Spalt mit einer newtonschen oder einer Maxwell-Flüssigkeit jeweils gleicher Schubviskosität beschickt wird. Eine ganz gleichlautende Aussage haben auch EHRMANN et al. /18/ beim Vergleich der theoretisch ermittelten Fließeigenschaften einer newtonschen und einer rein viskosen, nicht-newtonschen Flüssigkeit durch den Walzenspalt gefunden.

Auch wenn viele der genannten Arbeiten keine geeigneten Zahlenbeispiele für die hier zu untersuchenden Druckfarben enthalten, so kann doch aufgrund der Angaben in den Arbeiten von MILL /3, 12/ sowie HELLINCKX und MEWIS /4, 5/ angenommen werden, daß die bisher durchgeführten theoretischen Arbeiten, die alle auf der Basis der hydrodynamischen Schmierfilmtheorie beruhen, unabhängig von der speziellen rheologischen Charakterisierung einer Druckfarbe, ein Schergefälle im Walzenspalt erwarten, das in der Größenordnung 10^4s^{-1} bis 10^6s^{-1} liegt. Diese hohen Schergefälle lassen auch den von VOET /7/ angegebenen Wert von etwa 10^6Pa für die an der Druckfarbe in einem Walzenspalt wirkende Schubspannung als durchaus plausibel erscheinen.

Demgegenüber bezweifelt GLÜCK /19/, daß Druckfarbe in Walzenspalten von Druckmaschinen derart großen Scherbeanspruchungen ausgesetzt wird. Im Rahmen seiner experimentellen Untersuchungen fand er, daß sich das Rollverhalten zweier einen solchen Spalt bildenden Walzen nicht ändert, wenn man auf die zuvor farbfreien Walzen eine etwa $2 \mu\text{m}$ dicke Schicht Farbe in der für Offset- und Hochdruckverfahren üblichen Konsistenz aufbringt. Weder die zwischen einer Stahl- und

einer Gummiwalze bestehende Druckkraft noch der zwischen ihnen bestehende Schlupf werden durch die Beschickung der Walzen mit Druckfarbe wesentlich beeinflusst. GLÜCK wies darauf hin, daß seine experimentellen Ergebnisse nicht in Einklang mit den Erwartungen aufgrund theoretischer Vorstellungen gemäß der einfachen hydrodynamischen Schmierfilmtheorie stehen. Maßgebend für das Abrollverhalten sei vielmehr der viskoelastische Bezug auf der Gummiwalze und nicht die Farbe zwischen den Walzen. GLÜCK nimmt deshalb an, daß der Transport der Druckfarbe durch den von einem viskoelastisch-starren Walzenpaar gebildeten Spalt erklärbar ist als ein Transport einer festkörperähnlichen Schicht, die nicht hinreichend durch Scherkräfte beansprucht wird, um ein Strömungsprofil aufzubauen.

1.3 Bedeutung und Zielsetzung des Vorhabens

Die voranstehenden Ausführungen zeigen, wie widersprüchlich die Vorstellungen über die Vorgänge in Walzenspalten von Farbwerkswalzen sind. Diese Vorgänge sind jedoch ebenso wie die bei der Farbspaltung in der Auslaufzone eines Walzenspaltes von ausschlaggebender Bedeutung für die Bildung einer für den Druckprozeß in geometrischer und rheologischer Hinsicht geeigneten Druckfarbenschicht sowie für die Farbübertragung auf den Bedruckstoff im eigentlichen Druckwerk. Es ist daher wissenschaftlich sehr wertvoll, tiefere Einsichten in die Vorgänge in einem Walzenspalt zu gewinnen. Erst die umfassende Kenntnis dieser Vorgänge gestattet, sie auch richtig zu verstehen und in zutreffender Weise auf allgemeine physikalische Prinzipien zurückzuführen. Dies ist insofern von wesentlicher Bedeutung, als die Druckmaschinen in der Vergangenheit weitgehend empirisch - ohne immer die genaue Kenntnis der physikalischen Vorgänge zu haben - für die Produktion hochwertiger Qualitäts-Druckprodukte herangereift sind, heute jedoch eine weitere erfolgreiche Entwicklung und Verbesserung der Maschinen, des Verarbeitungsprozesses und der erreichbaren Druckqualität auf lange Sicht nur mit dem

Verständnis der den verschiedenen Prozessen zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten möglich erscheint.

So werden heute zur Optimierung der Farbwerke bezüglich der Durchmesser der Walzen und ihrer gegenseitigen Anordnung sog. Farbwerksrechnungen ausgeführt /20/.

Als Kennzahl für die Vorgänge in einem Farbwerk geht in diese Rechnungen lediglich die Farbspaltungszahl ein. Diese Zahl gibt an, in welchem Verhältnis sich die Farbschicht in einem Spalt zweier rotierender Walzen am Ausgang dieses Spaltes auf die beiden Walzen aufteilt. Für diese Zahl wird derzeit meist eine hälftige Teilung angenommen. Es liegt auf der Hand, daß derartige Berechnungen - so wertvoll sie bereits heute für die Entwicklung neuer Walzenfarbwerke auch sind - die Prozesse in einem Walzenfarbwerk nur sehr summarisch über den Farbspaltungsfaktor erfassen, und sie deshalb nicht in der Lage sind, die in der Praxis des Druckens oftmals auftretenden Schwierigkeiten in ihrer Gesamtheit vorher zu bestimmen. Eine genauere Kenntnis der Vorgänge in einem Spalt und an dessen Ausgang kann aber zu einem differenzierteren Ansatz und somit zu einer Verbesserung der Aussagesicherheit derartiger Rechnungen beitragen.

Das Wissen um diese Vorgänge ist aber auch dann wünschenswert und zweckmäßig, wenn wegen verbesserter Bedruckbarkeitseigenschaften oder wegen einer kürzeren Trockenzeit der Farbe oder aber auch aus Gründen des Umweltschutzes tiefgreifende Änderungen der Zusammensetzung und der Struktur der Druckfarbe notwendig werden. Um derartige Veränderungen und Verbesserungen gezielt und erfolgversprechend angehen zu können, ist es nämlich notwendig, die Grenzen zu kennen, innerhalb deren solche Veränderungen unter Beibehaltung des Druckverfahrens, gegebenenfalls aber nach Anpassung des Walzenfarbwerks an diese Veränderungen, durchführbar sind. Diese Grenzen können aber nur dann klar erfaßt werden, wenn man die Vorgänge in einem Walzenspalt und an dessen Auslauf kennt und aufgrund der allgemeinen physikalischen Gesetze versteht.

Weiterhin sei hier noch auf einen Gesichtspunkt hingewiesen, der von zukünftiger Bedeutung sein kann. So ist nämlich heute bereits die Möglichkeit gegeben, Druckformen mit höchster Detailauflösung herzustellen, auf denen Linienabstände bis hinab zu $0,1\text{ }\mu\text{m}$ klar getrennt sind /21/. Obwohl diese Möglichkeit die Erfordernisse eines normalen Druckproduktes bei weitem übersteigt, kann ihre Anwendung für spezielle Anforderungen (z.B. im Wertpapierdruck, Herstellung integrierter Schaltungen oder gegebenenfalls im Zuge einer Innovation beim Druck holographischer Strukturen) von Interesse sein.

Tatsächlich versucht man bereits, die Möglichkeiten und Grenzen des Druckens mikrofeiner Strukturen im Offsetverfahren abzuklären /22/. Für ein Drucken feinsten Details in einem Druckbild können jedenfalls genaue Kenntnisse über die Vorgänge in einem Walzenspalt ebenfalls sehr wertvoll sein, insbesondere wenn man die heute existierenden Grenzen für das Drucken feiner Strukturen in Richtung einer höheren Auflösung zu verschieben versucht.

In einer Reihe von experimentellen Untersuchungen wurde mit diesem Forschungsvorhaben das Ziel angegangen, näheren Aufschluß über das Verhalten von Druckfarben in Walzenspalten von Druckmaschinen zu erhalten. Die Ergebnisse dieser experimentellen Untersuchungen und die aus ihnen zu ziehenden Schlußfolgerungen werden in dem vorliegenden Bericht dargelegt.

Ausgehend von dem in Abschn. 1.2 dargelegten Gegensatz zwischen den Erwartungen, die aus theoretischen Vorstellungen gemäß der hydrodynamischen Schmierfilmtheorie gefolgert werden und der von GLÜCK erhaltenen experimentellen Befunde, lag es zu Beginn der Untersuchung nahe, zunächst photoanalytische Untersuchungen von der Spaltzone eines viskoelastisch-starren Walzenpaares auszuführen. Hierbei wurden die Verhältnisse in der Spaltzone zweier eingefärbter Walzen unter verschiedenen

Bedingungen im statischen und dynamischen Zustand photographisch erfaßt. Mit diesen Untersuchungen konnte insbesondere die Frage geklärt werden, ob zwischen den Oberflächen einer starren und einer viskoelastischen Walze auch bei Beschickung der Walzen mit Farbe direkte Kontaktstellen zwischen den Walzenoberflächen bestehen, die für das Rollverhalten entscheidend sind. Die optischen Grundlagen, die Durchführung sowie Einzelheiten dieser und anderer mit Hilfe dieses Verfahrens gewonnener Ergebnisse werden in Kap. 3 wiedergegeben.

Auch das Rollverhalten einer Gummiwalze gegenüber einer starren, angetriebenen Walze wurde unter Einbeziehung der verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht. Die Ergebnisse hierzu sind in Kap. 4 zu finden. Diese Untersuchungen erfolgten bei Beschickung der Walzen mit verschiedenen Ölen, deren Fließverhalten dem Newtonschen Gesetz entsprach, sowie bei Einsatz praxisüblicher Druckfarbe. Zu Vergleichszwecken wurden auch Messungen an nackten Walzen ausgeführt. Die im Rahmen dieser Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse gestatteten, einige Zusammenhänge zwischen dem Rollverhalten der viskoelastischen Walze, das insbesondere durch ihren Schlupf gegenüber der starren Walze charakterisiert wurde, und geometrischen sowie rheologischen Eigenschaften der zwischen den Walzen befindlichen Flüssigkeits- oder Farbschicht herzu-leiten.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst der Versuchsstand beschrieben, an dem die Untersuchungen stattfanden, sowie die eingesetzte Meßtechnik näher dargelegt.

2. D E R V E R S U C H S S T A N D

Eine Gesamtansicht des eigentlichen Versuchstandes, jedoch ohne Versorgungs-, Auswerte- und Anzeigegeräte, ist in Abb. 1 zu sehen.

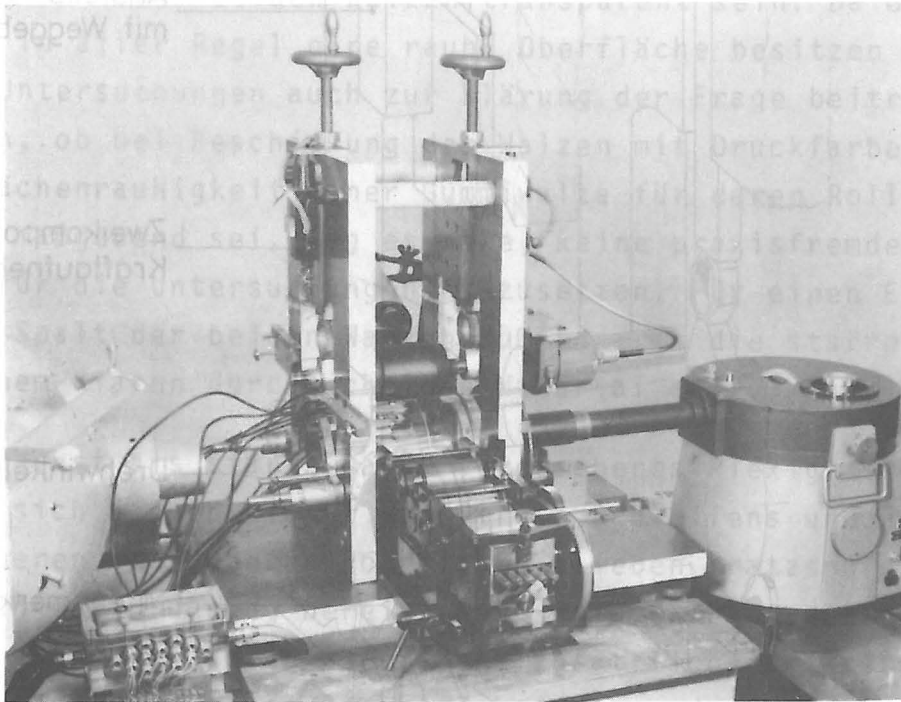


Abb. 1 Ansicht des Versuchstandes mit Farbflußeinrichtung (ohne Versorgungs-, Auswerte- und Anzeigegeräte)

2.1 Der mechanische Aufbau

Die Untersuchungen erfolgten an einem Zweiwalzenstuhl, bei dem die eine Walze praktisch starr war und die andere einen viskoelastischen Gummibelag hatte und an erstere angestellt werden konnte. Ein solches Zweiwalzensystem bildet im Falle gegenseitiger Anstellung einen Ausschnitt aus dem Walzensystem eines Farbwerkes von Buch- oder Offset-Druckmaschinen. Denn bei diesen sind hart-elastische Walzen und mit Gummi bezogene Walzen im allgemeinen abwechselnd angeordnet (vgl. Abschn. 1.1). Der Aufbau des Zweiwalzenstuhles ist in seinen wesentlichen Zügen in Abb. 2 wiedergegeben.

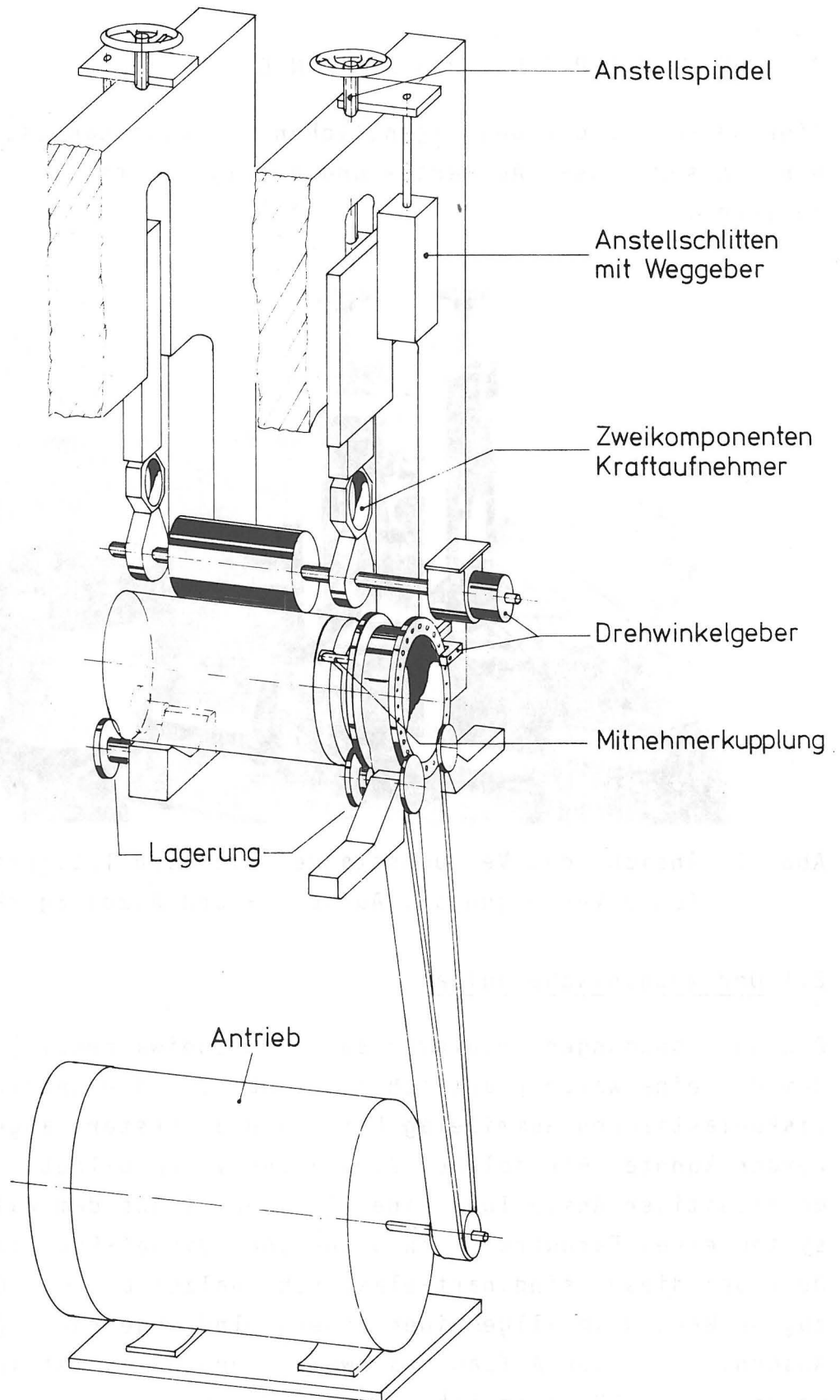


Abb. 2 Prinzipieller Aufbau des Zweiwalzenstuhles ohne Farbflußeinrichtung

Aufgrund der genannten Zielrichtung sollten beide Walzen in Material und Oberflächenbeschaffenheit möglichst denen in Farbwerken von Druckmaschinen entsprechen. Andererseits mußte zur Durchführung der photoanalytischen Untersuchungen mindestens eine der beiden Walzen transparent sein. Da Gumm walzen in aller Regel eine rauhe Oberfläche besitzen und da diese Untersuchungen auch zur Klärung der Frage beitragen sollten, ob bei Beschickung der Walzen mit Druckfarbe die Oberflächenrauigkeit einer Gumm walze für deren Rollverhalten maßgebend sei, lag es nahe, keine praxisfremde Gumm walze für die Untersuchungen einzusetzen. Für einen Einblick in den Spalt der beiden Walzen mußte somit die starre Walze aus einem klaren durchsichtigen Material sein.

Ein zunächst als starre Walze vorgesehenes Plexiglasrohr bewährte sich jedoch nicht. Denn trotz Schleifens und Polierens der inneren und äußeren Rohrfläche blieben Kratzspuren zurück. Und nach Durchführung bereits nur weniger Untersuchungen mit diesem Rohr wies deren Oberfläche zusätzliche Kratzspuren auf, die zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der photoanalytischen Untersuchungen jedesmal durch eine Feinstpolitur hätten beseitigt werden müssen. Als starre, durchsichtige Walze kam deshalb ein Glasrohr zum Einsatz, das die für die Untersuchungen notwendigen Qualitätseigenschaften besaß: Es war im sichtbaren Licht durchsichtig und klar, nahezu schlierenfrei sowie innen und außen geschliffen und poliert. Außerdem blieb seine Oberfläche im Gegensatz zu dem zuerst eingesetzten Plexiglasrohr während der Untersuchungen kratzerfrei.

Entsprechend den üblichen Verhältnissen in einem Farbwerk wird die Glaswalze als starre Walze angetrieben, die Walze mit dem viskoelastischen Gummibelag durch Friktion mitgenommen. Damit keine Spannungen das Glasrohr beim Antrieb beschädigen, wurde eine besondere Vorrichtung zum Antrieb entwickelt, die in Form einer Mitnehmerkupplung eine Riemenscheibe mit einem in das Glasrohr gefaßten Metallring verbindet. Die Glaswalze mit dem

Metallring wurde zur Kleinhaltung von durch Unwuchten bedingten Massenkräften zusätzlich statisch ausgewuchtet. Die Riemenscheibe wurde mit Hilfe eines stufenlos regelbaren Elektromotors über einen angelegten Flachriemen angetrieben. Das Glasrohr selbst war auf vier Kuhststoff-Röllchen, die Riemenscheibe auf vier Messing-Rollen gelagert. Diese Kunststoff- und Messing-Rollen waren durch Einsatz von Kugel- bzw. Nadellagern leicht drehbar an festsitzenden Sockeln befestigt und rollten jeweils seitlich am Glasrohr bzw. an der Riemenscheibe in Umfangsrichtung ab.

Die Achse der Gummiwalze war an ihren beiden Enden in gut geschmierten Gleitlagern gelagert. Jedes dieser Gleitlager befand sich an einem Tragarm, der jeweils mit Hilfe eines Handrades über eine Spindel und eine Schlittenführung exakt vertikal verschiebbar war. Diese Anordnung entsprach der bereits von PFEIFFER /23/ benutzten. Sie gestattete, die Gummiwalze jeweils so an die Glaswalze anzustellen, daß eine über die gesamte Walzenbreite möglichst gleichmäßige Berührung vorlag

Die Flüssigkeit- und Farbauftragung auf die beiden Walzen erfolgte auf verschiedenen Wegen. Bei einem Teil der Untersuchungen wurde ein jeweils vorher festgelegtes Farbvolumen gleichmäßig auf einem Farbverreibstuhl und einer mitlaufenden Walze aus Stahl verteilt. Die so eingefärbte Stahlwalze wurde an die Gummiwalze des Zweiwalzenstuhles angelegt, so daß bei Rotation alle drei Walzen eingefärbt wurden. Die Untersuchungen wurden dann jeweils nach Erreichen einer gleichmäßigen Farbschichtdicke auf den Walzen ausgeführt. Hierzu konnte die Stahlwalze über einen Hebelarm von der Gummiwalze abgestellt werden, so daß von ihr kein Einfluß auf die zu gewinnenden Ergebnisse ausging. Andererseits besaß die Stahlwalze am Hebelarm ein Lagerspiel in axialer Richtung, das es gestattete, eine Changierbewegung auszuführen. Mit ihr wurde die Farbschicht auf den Walzen zwischen den Messungen oder auch während des photoanalytischen Arbeitens nach Anlegung der Auftragswalze an die Gummiwalze axial verreiben.

Später wurde die Farbauftragung mit Hilfe der transportablen Stahlwalze durch den Anbau einer Farbflußeinrichtung an den Zweiwalzenstuhl ersetzt. Das gesamte System bildete nun ein kleines Farbwerk, in dem die bisherige Zweiwalzenanordnung enthalten ist. Es ist in Abb. 1 von der Farbzuführungsseite her zu erkennen. In Abb. 3 ist es in Form eines Walzenschemas dargestellt. Die Farbzuführung aus einem Farbkasten erfolgte über eine Duktor- und eine Heberwalze. Letztere liegt abwechselnd an der Duktor- und an einer der beiden Verreiberwalzen in der Walzenkette an. Die hier notwendige Heberwalzenbewegung ist linear und wird durch an der Achse der Duktor- und der Heberwalze befestigte Nockenscheiben gesteuert. Bei Anliegen der Heberwalze an der Duktorwalze nimmt sie von dieser einen Teil der Farbe auf, die diese selbst aus dem Farbkasten mitgeführt hat. Nach Abheben an der Duktorwalze überträgt die Heberwalze die aufgenommene Farbe an die ihr benachbarte Verreiberwalze und somit an die kontinuierliche Walzenkette. An ihrem Ende wird die Farbabführung durch Abrakeln an einem gegen eine Stahlwalze angelegten Rakelmesser erreicht.

Die durch das Duktor-Heber-Prinzip verursachte diskontinuierliche Farbzuführung wird durch die geometrische Anordnung und unterschiedlichen Radien der beiden Verreiber- und Übertragwalzen ausgeglichen, so daß im eigentlichen Meßsystem in Umfangsrichtung eine weitgehend schwankungsfreie Farbschichtdicke vorliegt. Für eine entsprechend gleichmäßige Farbschicht in axialer Richtung sorgen die beiden Verreiberwalzen infolge ihrer axialen Changierbewegung. Diese wird automatisch durch eine auf der jeweiligen Achse sitzende Führungsnut erreicht. Die Frequenz der Querbewegung der beiden Verreiberwalzen ist somit der Umfangsgeschwindigkeit der beiden Walzen proportional. Die beiden Verreiberwalzen werden mit Hilfe von Zahnriemen vom gleichen Motor wie die Glaswalze angetrieben. Das Übersetzungsverhältnis der zugehörigen Zahnriemenscheiben ist so gewählt, daß die Umfangsgeschwindigkeit der beiden

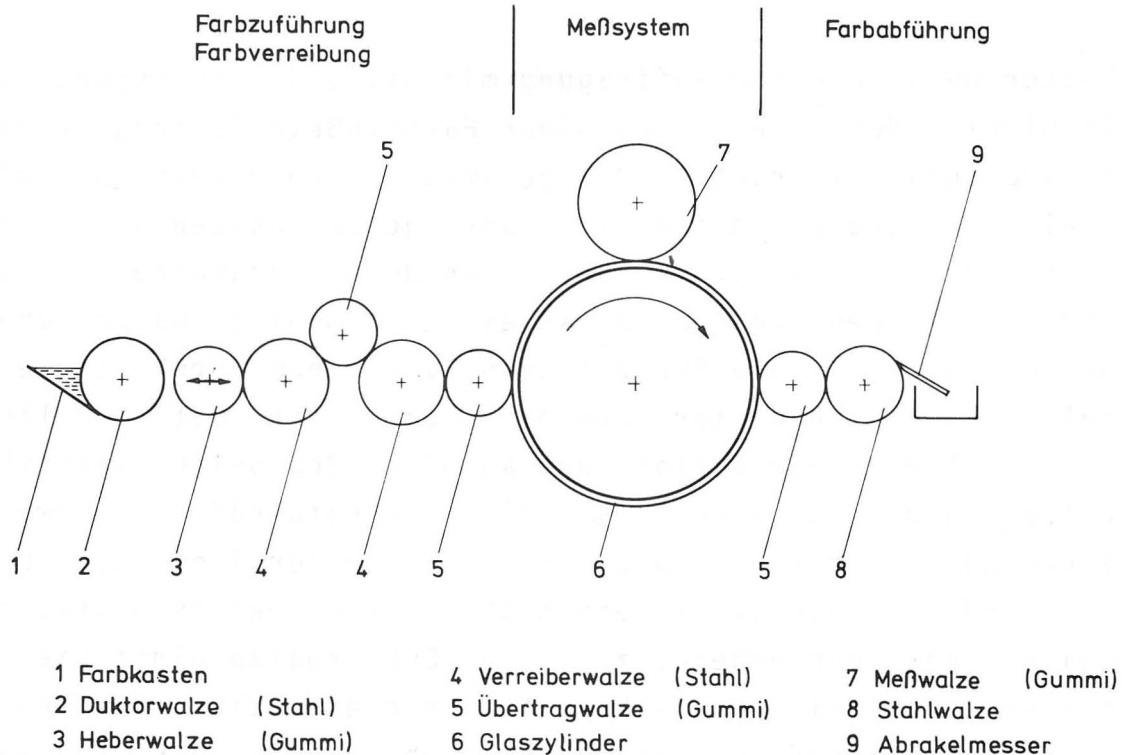


Abb. 3 Walzensystem des Versuchsstandes mit Farbflußeinrichtung

Verreiberwalzen genau mit der der Glaswalze übereinstimmt. Auch die Duktorwalze wird angetrieben; sie läuft jedoch wegen einer zusätzlichen Zahnradübersetzung wesentlich langsamer. Alle anderen Walzen werden durch Friktion mitgenommen.

Sowohl der Farbzuführungs- und -verreibungsteil als auch der Farbabführungsteil bilden konstruktiv jeweils eine Einheit, die jede für sich an die Glaswalze angestellt werden kann. Wird nun die Farbzuführungs- und Verreibereinheit an die Glaswalze angestellt, die zwischen den beiden Verreiberwalzen mitlaufende Übertragwalze jedoch entfernt, so erhält man ein Vierwalzensystem, das die Glaswalze, die Gummiwalze, eine Übertragwalze und eine Verreiberwalze enthält. Mit diesem System ist es möglich, Untersuchungen mit einem bestimmten auf die Walzen aufgetragenen Flüssigkeits- oder Farbvolumen auszuführen. Es wurde besonders im Falle der Untersuchungen mit Ölen eingesetzt.

2.2 Die Meßtechnik für die zu erfassenden mechanischen Größen

In Abb. 4 ist die Anlage zur Erfassung der verschiedenen

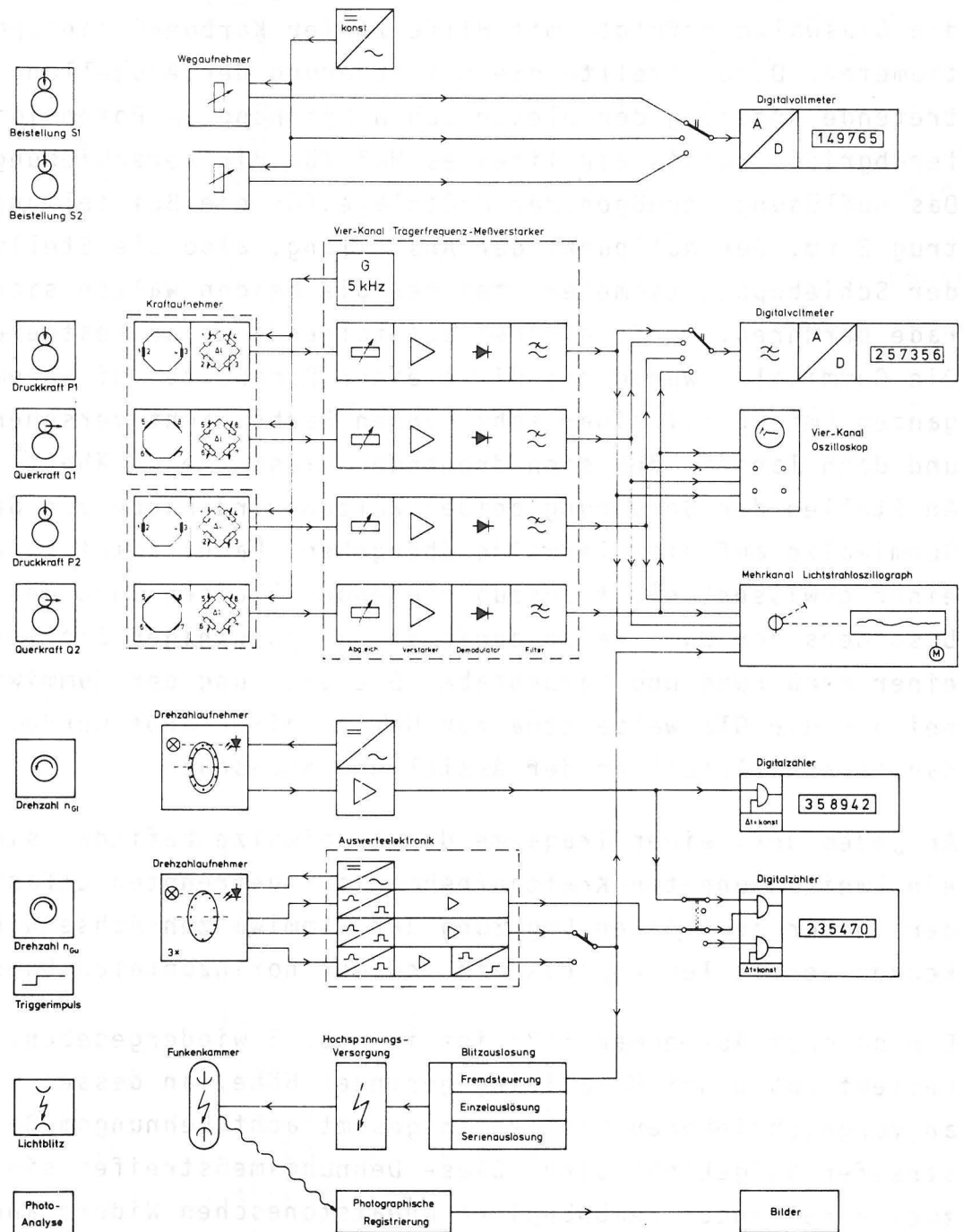


Abb. 4 Blockschaltbild zur Meßwerterfassung mechanischer Größen

mechanischen und kinetischen Meßwerte in Form eines Blockschaltbildes wiedergegeben.

Die Messung der geometrischen Anstellung der Meßwalze^{*)} an die Glaswalze erfolgte mit Hilfe zweier Karbon-Schiebepotentiometer. Dabei stellte die bei Änderung der Anstellung auftretende Änderung der elektrischen Spannung am Potentiometerabgriff jeweils ein lineares Maß für die Verschiebung dar. Das Auflösungsvermögen der Meßanlage für die Beistellung betrug 2 μm . Der Nullpunkt der Anstellung, also die Stellung der Schiebepotentiometer, bei der die beiden Walzen sich gerade berühren, wurde hierbei auf folgende Weise festgelegt: Die Gummiwalze wurde mit Hilfe einer Handwalze auf ihrem ganzen Umfang mit einer sehr dünnen Farbschicht versehen und dann langsam der sich drehenden Glaswalze genähert. An Stellen der Berührung beider Walzen wird Farbe von der Gummiwalze auf die Glaswalze übergeben. Dabei kommt es wegen einer gewissen, nicht auszugleichenden kleinen Unrundheit besonders der Gummiwalze zunächst nur an einigen Stellen zu einer Berührung und Farbabgabe. Die Stellung der Gummiwalze, bei der die Glaswalze etwa zur Hälfte eingefärbt wurde, wurde dann als Nullstellung der Anstellung angesehen.

An jedem der beiden Tragarme der Gummiwalze befindet sich ein Zweikomponenten-Kraftaufnehmer zur getrennten Erfassung der an der jeweiligen Lagerung der Gummiwalzen-Achse wirkenden vertikalen Anpreßkraft und der horizontalen Querkraft.

Ein solcher Aufnehmer /23/ ist in Abb. 5 wiedergegeben. Er besteht aus einem Metallring geringer Höhe, an dessen Mantel an vorgeschriebenen Stellen insgesamt acht Dehnungsmeßstreifen aufgeklebt sind. Diese Dehnungsmeßstreifen sind zu zwei voneinander unabhängigen Wheatstoneschen Widerstands-

^{*)} Meßwalze ist hier die Gummiwalze, da an ihr die meisten Meßwertgeber angebracht sind.

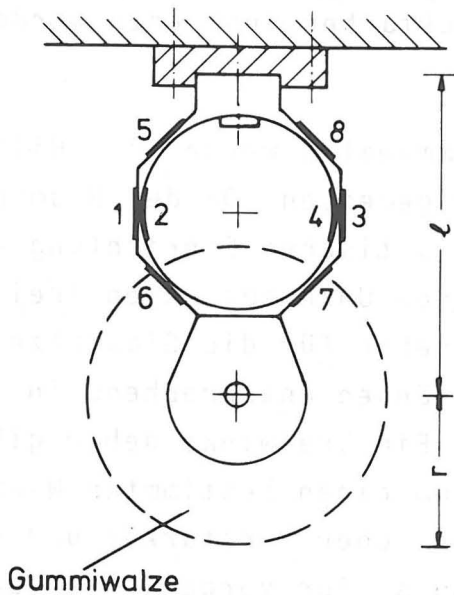


Abb. 5 Zweikomponenten-Kraftaufnehmer

Meßbrücken zusammengeschaltet. Bei Einwirkung einer Kraft in vertikaler oder horizontaler Richtung wird der Meßring elastisch beansprucht, was infolge Änderung des elektrischen Widerstandes der Dehnungsmeßstreifen zu einer Verstimmung des betreffenden, im unbelasteten Zustand abgeglichenen Widerstandsbrückenkreises führt. Diese Verstimmung stellt ein Maß für die einwirkende Kraft dar und wird mit Hilfe eines Trägerfrequenz-Meßverstärkers in eine leicht meßbare elektrische Spannung überführt.

Die meßtechnisch-theoretischen Grundlagen solcher Kraftaufnehmer sind von GLADUN und FÖRSTER /24/ eingehend dargelegt worden. - Das Auflösungsvermögen der Meßanlage betrug im statischen Fall, also bei Stillstand der Walzen, für die Druckkraft 0,02 N und für die Querkraft 0,005 N. Eine solche Güte der Messungen war jedoch bei Rotation der Walzen nicht erreichbar, da insbesondere bei höheren Walzengeschwindigkeiten Schwingungen und stochastische Schwankungen auftraten, die sich störend auswirkten. Diese Schwingungen und Schwankungen konnten durch den Einsatz eines Tiefpaßfilters nur teilweise geglättet werden. Die angegebenen Meßwerte wurden deshalb aus Mittelungen über diese Schwingungen und Schwankungen gewonnen. - Das Auftreten von Schwingungen und stochastischen Schwankungen scheint ein grundsätzliches Problem zu sein, auf das bereits GLÜCK /25/ im Falle von Momentenmessungen an einem Mehrwalzensystem hingewiesen hat.

Die Anordnung zur Messung der auf die beiden Lager der Gummiwalze wirkenden Querkraft entspricht prinzipiell der Anord-

nung zur Messung von Tackwerten, die in der Druckindustrie als eine wesentliche Größe zur verarbeitungstechnisch-rheologischen Charakterisierung von Druckfarben angesehen werden /7, 8, 12, 26/.

Die Drehzahlen der Glas- und der Gummiwalze werden mit Hilfe opto-elektronischer Drehwinkelgeber gemessen. Da der Raum um die Drehachse der Glaswalze für die optischen Einrichtungen zur Durchführung der photoanalytischen Untersuchungen frei bleiben mußte, wurde ein Drehwinkelgeber für die Glaswalze diesen besonderen geometrischen Umständen entsprechend in einer Eigenkonstruktion entwickelt. Ein Drehwinkelgeber gibt bei Drehung der betreffenden Walze um einen bestimmten Winkel jeweils einen elektrischen Impuls ab. Über Verstärker und digitale Zähler lassen sich diese Impulse für vorgewählte Torzeiten aufsummieren. Die so erhaltene Impulssumme ist direkt proportional zur Drehzahl und zur Umfangsgeschwindigkeit der betreffenden Walze.

Auch das Verhältnis der für jede Walze gebildeten Impulssumme kann durch eine elektronische Schaltung gebildet und auf einem Digitalzähler angezeigt werden. Dieses Verhältnis dient der Ermittlung des Schlupfes zwischen den beiden Walzen. Beide Größen sind durch eine lineare Beziehung miteinander verknüpft, wobei der Schlupf als die relative Abweichung der Oberflächengeschwindigkeit der nicht deformierten Gummiwalze von der der Glaswalze, bezogen auf letztere, definiert ist /19/.

Darüber hinaus können Impulsfolgen verschiedenster Drehwinkelintervalle zu Triggerzwecken verwendet werden. So wurde bei den photoanalytischen Untersuchungen oft davon Gebrauch gemacht, über eine Triggerung mit Hilfe des Drehwinkelgebers an der Gummiwalze einen Funkenblitz zur Beleuchtung des Walzenspaltes bei stets gleicher Winkelstellung der rotierenden Gummiwalze auszulösen.

Von den hier genannten Größen wurden bei jeder Einzelmessung stets die Walzenbeistellung und die Umfangsgeschwindigkeit

der Glaswalze vorgegeben. Dagegen bilden die Meßwerte für die Druck- und Querkkräfte sowie der Schlupf der Gummiwalze gegenüber der Glaswalze die sich daraufhin einstellenden Werte.

2.3 Die Farbschichtdicken-Meßeinrichtung

Zur Messung der Farbschichtdicken auf den Walzen eines Farberkes sind schon verschiedene Verfahren angewandt und in der Literatur beschrieben worden. Dabei handelte es sich um die verschiedensten Methoden unter Ausnutzung mechanischer, dielektrischer, magnetischer, optischer, radioaktiver oder korpuskular-atomarer Prozesse. Sie wurden unter Berücksichtigung ihrer Vor- und Nachteile in /20, 27/ näher diskutiert. Praktische Bedeutung für die Farbschichtdickenmessung haben bisher jedoch neben gravimetrischen bzw. volumetrischen Methoden die mechanische Abstandsänderung zwischen zwei metallischen Walzen /17/ sowie die optische Transmissions-/27, 28/ oder Remissionsverfahren /20, 29/ gewonnen.

Während bei Untersuchungen an einem Drei- oder Vierwalzensystem die Farbschichtdicke aus dem Quotienten eines einmal aufgetragenen Farbvolumens und der Oberfläche aller beteiligten Walzen bei gleichmäßiger Farbverteilung auf den Walzen hinreichend genau bestimmt werden konnte, war nach Anbau der Farbflußeinrichtung die Entwicklung und Errichtung einer besonderen Farbschichtdicken-Meßeinrichtung notwendig.

Da sich im Walzensystem des Versuchsstandes bereits eine transparente Walze befand, lag die Anwendung des optischen Transmissionsverfahrens zur Schichtdickenbestimmung nahe.

2.3.1 Optische Grundlagen zur Konzeption

Das Prinzip dieses Verfahrens besteht darin, die Schwächung der Intensität des auf die Farbschicht einfallenden und durch sie hindurchtretenden Lichtes zu messen. Diese Inten-

sitätsschwächung stellt ein Maß für die Schichtdicke dar. Der Zusammenhang zwischen beiden Größen wird durch das Lambert'sche Gesetz

$$I = I_0 e^{-\mu h} \quad (1)$$

beschrieben /30/. In ihm stellt I_0 die in die Schicht der Dicke h einfallende, I die von ihr durchgelassene Strahlungsintensität dar. Von Reflexionsverlusten an den Grenzflächen der Farbschicht sei hierbei abgesehen. Die Schwächung des Lichtes in der Farbschicht kann durch Absorption und Streuung erfolgen. Der Schwächungskoeffizient μ setzt sich somit additiv aus einem Anteil für die Absorption und einem für die Streuung zusammen. Gl. (1) gilt natürlich nur, wenn die absorbierenden und streuenden Zentren (i. a. die Pigmente) in der gesamten Farbschicht gleichmäßig verteilt sind und ihre Konzentration in der Farbschicht stets einen konstanten Wert besitzt.

Darüber hinaus gilt Gl. (1) nur für monochromatisches Licht, denn der Schwächungskoeffizient μ hängt - wie bereits der coloristische Eindruck einer Farbe zeigt - von der Wellenlänge ab.

Ist das einfallende Licht nicht monochromatisch und besitzt es eine spektrale Intensitätsverteilung $I_0(\lambda)$, so ist

Gl. (1) durch

$$I_g = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) e^{-\mu(\lambda)h} d\lambda \quad (2)$$

zu ersetzen. In dieser Beziehung stellen λ_1 und λ_2 die Wellenlängengrenzen des Lichtspektrums und I_g die gesamte von der Farbschicht hindurchgelassene Intensität dar. Sie entspricht der auf einen Lichtdetektor einfallenden Intensität, wenn in $I_0(\lambda)$ die spektrale Verteilung des von der Lichtquelle emittierten Lichtes und die spektrale Verteilung der Transparenz des gesamten Lichtweges außerhalb der eigentlich zu vermessenden Farbschicht einschließlich eines evtl.

vorhandenen Farbfilters und die an der Farbschicht auftretenden Reflexionsverluste eingehen^{*)}). Besitzt der Lichtdetektor die spektrale Empfindlichkeit $\sigma(\lambda)$, so liefert er ein Signal Φ , das sich zu

$$\Phi = F \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \cdot \sigma(\lambda) d\lambda = F \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) \cdot e^{-\mu(\lambda)h} \cdot \sigma(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

ergibt. Hierin bedeutet F die effektive Größe der Meßfläche.

Die vorstehenden Gleichungen lassen erkennen, daß der Zusammenhang zwischen der Schichtdicke h und der transmittierten Lichtintensität I_g bzw. des Detektorsignales Φ nicht linear ist. Zur Messung der Schichtdicke ist jedoch auf der Farbschicht eine gewisse Fläche erforderlich, durch die das Licht hindurchtritt. Innerhalb dieser Meßfläche sollte die Farbschichtdicke jeweils konstant sein. Dies ist bei Druckfarben auf Farbwerkswalzen jedoch im allgemeinen nicht gegeben. Wegen der Farbfadenbildung und -spaltung in der Auslaufzone eines Walzenspaltes besitzt die Farbschicht auf einer Walze stets eine gewisse Oberflächenstruktur und eine variable Schichtdicke, die umso stärker in Erscheinung treten, je näher die Meßstelle an der Spaltauslaufzone liegt und je schneller die Walzen drehen. Wegen der Nichtlinearität des Zusammenhanges zwischen Meßsignal und Schichtdicke kann im allgemeinen aber auch keine exakte Messung der auf

^{*)} Soweit die Transparenz des optischen Lichtweges nach Durchstrahlen der Farbschicht kleiner als 1 ist, weicht die hier gegebene Bedeutung für $I_0(\lambda)$ von der zu Gl. (1) gegebenen (für I_0) ab. Für die eigentliche Schichtdickenmessung ist dies jedoch unerheblich, da die Reihenfolge der einzelnen optischen Prozesse zur Intensitätsabschwächung keinen Einfluß auf das Detektorsignal und somit auf das Ergebnis der Schichtdickenmessung besitzt.

der Meßfläche befindlichen mittleren Schichtdicke erfolgen. Dies sei zunächst an einem Beispiel näher erläutert, das in Abb. 6 schematisch skizziert ist.

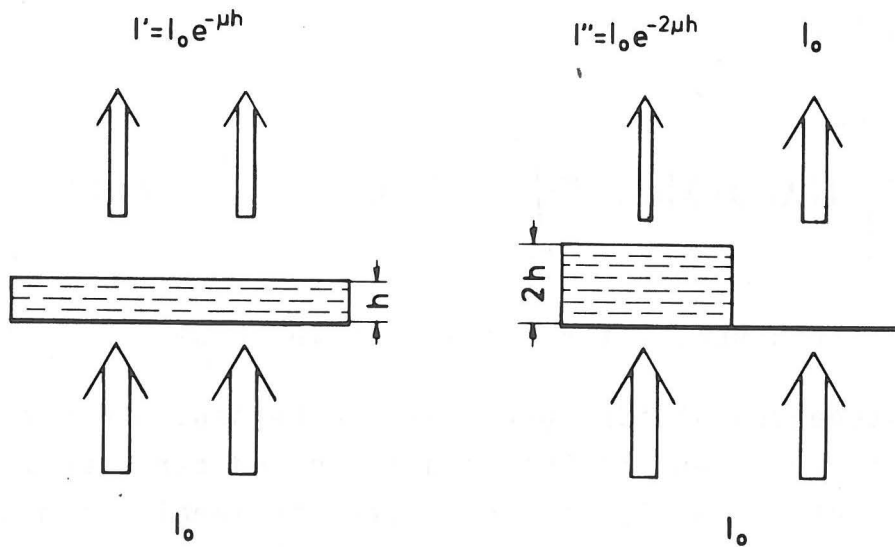


Abb. 6 Lichtschwächung bei jeweils mittlerer Farbschichtdicke (nähere Erläuterung im Text)

Diese Abbildung stellt links eine Meßfläche mit einer Farbschicht konstanter Dicke h dar, auf die von unten Licht der Intensität I_0 eindringt und die dieses Licht auf die Intensität $I = I_0 e^{-\mu h}$ abschwächt. Der Einfachheit halber sei hier monochromatische Strahlung angenommen. Rechts dagegen befindet sich auf der gleichen Meßfläche das gleiche Farbvolumen, nur daß dieses nun auf der einen Hälfte in doppelter Dicke vorliegt, während die andere Hälfte farbfrei ist. Die mittlere Farbschichtdicke beträgt also wieder h . Trotzdem unterscheiden sich in beiden Fällen die pro Zeiteinheit durch die Meßfläche der Größe F hindurchgegangenen Strahlungsenergien E_1 und E_r .

Im ersten Fall beträgt sie

$$E_1 = F \cdot I_0 \cdot e^{-\mu h} \quad (4a)$$

im zweiten Fall dagegen

$$E_r = \frac{1}{2} F \cdot I_0 (1 + e^{-2\mu h}) \quad (4b)$$

Dieses Beispiel mag zwar sehr extrem sein, doch zeigt es den zu demonstrierenden Sachverhalt recht deutlich.

Nimmt man nun an, daß die Farbschichtdicke auf der Meßfläche eine Funktion ihrer Koordinaten x, y auf dieser Fläche ist, so muß Gl. (3) durch

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda) I_0(\lambda) \cdot \left[\iint_F e^{-\mu(\lambda) h(x,y)} dx dy \right] d\lambda \quad (5)$$

ersetzt werden. Mit

$$h(x,y) = \bar{h} + \Delta h(x,y) \quad (6)$$

wobei \bar{h} der Mittelwert von h über die Meßfläche und $\Delta h(x,y)$ die von x und y abhängige Abweichung der Größe h von ihrem Mittelwert darstellt, läßt sich Gl. (5) in der Form

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda) I_0(\lambda) \cdot e^{-\mu(\lambda) \bar{h}} \left[\iint_F e^{-\mu(\lambda) \Delta h(x,y)} dx dy \right] d\lambda \quad (7)$$

schreiben. Hierbei kann $\Delta h(x,y)$ sowohl positive als auch negative Werte annehmen, denn es gilt stets

$$\iint_F \Delta h(x,y) dx dy = 0. \quad (8)$$

Das in Gl. (7) in eckigen Klammern stehende Flächenintegral ist näherungsweise dann gleich 1, wenn

$$|\mu(\lambda) \cdot \Delta h(x,y)| \gg 1 \text{ für alle } x, y \text{ und } \lambda \text{ ist} \quad (9)$$

Diese Bedingung ist für die Entwicklung eines Farbschichtdicken-Meßgerätes sehr wesentlich. Sie besagt, daß bei zu erwartenden Schwankungen innerhalb der Meßfläche das Produkt $\mu(\lambda) \cdot \Delta h(x,y)$ betragsmäßig klein gehalten werden muß, wenn Φ ein Maß für den Mittelwert der Farbschichtdicke sein soll.

Allerdings muß auch, damit überhaupt Schichtdicken gemessen werden können, $\mu(\lambda)$ für alle λ größer als 0 sein. Die in der Drucktechnik oft anzutreffende und durch die übliche Praxis densiometrischer Messungen nahegelegte Ansicht, daß Farbschichtdicken am geeignetsten zu messen sind, wenn man im Licht der zu vermessenden Druckfarbe komplementären Farbe arbeitet, ist also bei der auf der Meßfläche nicht konstanten Farbschichtdicken unter Beachtung der Bedingung (9) in Betracht der dann vorliegenden großen Schwächungskoeffizienten nicht unbedingt richtig. Darüber hinaus würde eine Schichtdickenmessung im Licht der zur Druckfarbe komplementären Farbe im Falle von Schichtdicken ab etwa $3 \mu\text{m}$ und mehr aus Gründen der dabei dann noch zur Verfügung stehenden Intensität I_g sehr schwierig und deshalb leicht fehlerhaft werden.

Letzteres ist wohl auch der Grund, warum Schichtdickenmessungen auf Farbwerkswalzen bisher fast stets im ungefilterten Licht einer Glühlampe ausgeführt wurden /20, 27, 28, 29/. Dieses Verfahren ist jedoch ebenfalls unbefriedigend. Denn das Emissionsspektrum einer solchen Lichtquelle steigt im sichtbaren Spektralbereich mit zunehmender Wellenlänge schnell an und besitzt sein Lichtstärkemaximum im allgemeinen im nahen Infrarot /31/. Gleiches gilt für die spektrale Verteilung der Empfindlichkeit vieler optoelektronischer Lichtempfänger /32/.

Als Beispiel ist in Abb. 7 die Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit eines Phototransistors und der Lichtstärke einer Glühlampe für den sichtbaren Spektralbereich wiedergegeben. Die Kurve für den Phototransistor ist der Arbeit /20/ entnommen. Für die Lichtstärke $L(\lambda, T)$ einer Glühlampe wurde angenommen, daß die Strahlungsemission entsprechend dem Planckschen Gesetz

$$L(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{C_2}{e^{\lambda T}} - 1} \quad (10)$$

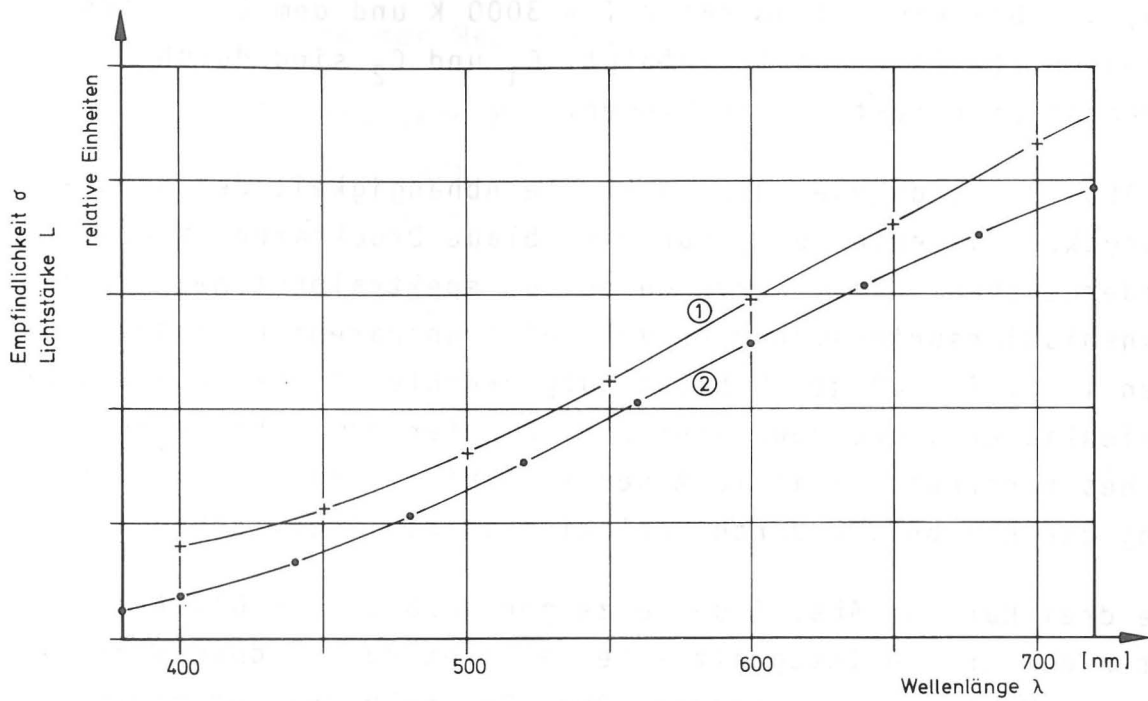


Abb. 7 Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit $\sigma(\lambda)$ eines Phototransistors (Kurve 1) und der Lichtstärke $L(\lambda, T)$ einer Glühlampe mit $T = 3000$ K (Kurve 2) im sichtbaren Spektralgebiet

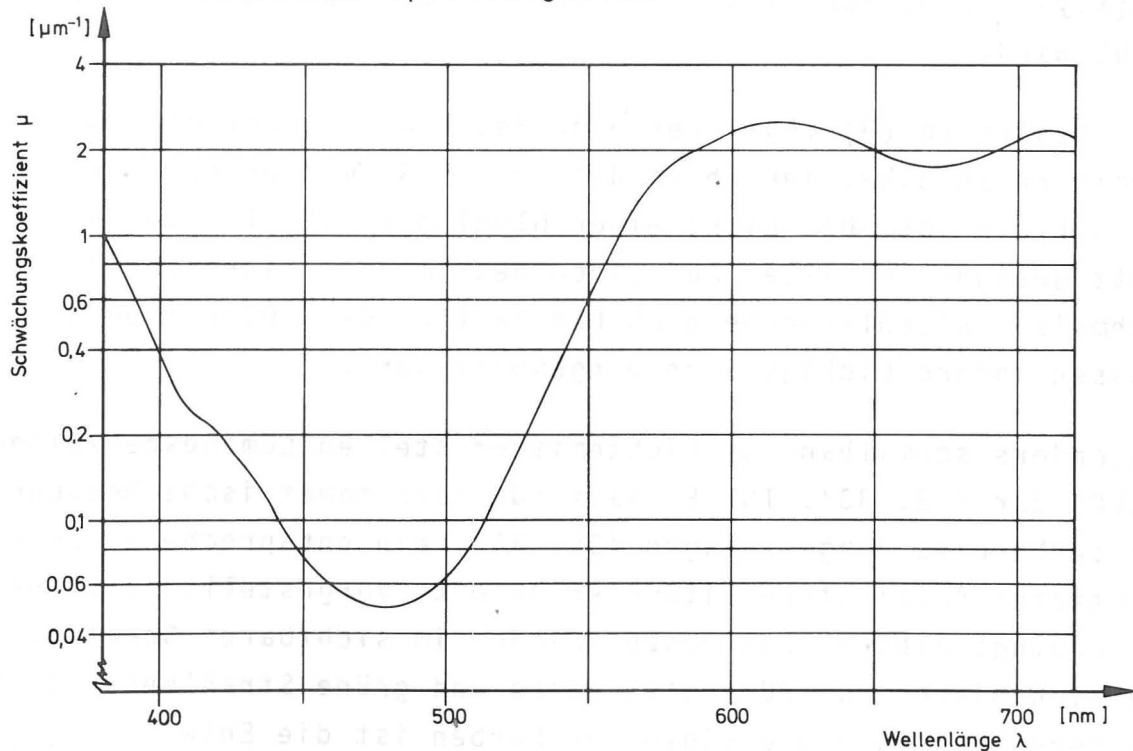


Abb. 8 Wellenlängenabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten $\mu(\lambda)$ für eine blaue Druckfarbe im sichtbaren Spektralgebiet

/30, 31/ bei einer Temperatur $T = 3000 \text{ K}$ und dem Emissionsvermögen $\varepsilon(\lambda, T) = \text{const.}$ erfolgt. C_1 und C_2 sind durch Naturkonstanten festgelegte Größen.

In Abb. 8 ist dagegen die spektrale Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten $\mu(\lambda)$ für eine blaue Druckfarbe (Cyan) wiedergegeben. Diese Kurve wurde aus spektralphotometrischen Transmissionsuntersuchungen von auf transparenten Glasplättchen in gleichmäßiger Schicht aufgebrachtter Druckfarbe unterschiedlicher Dicke gewonnen; ein im Referenzstrahl befindliches farbfreies Glasplättchen eliminierte eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Reflexion an den Oberflächen.

Die drei Kurven Abb. 7 und 8 zeigen, daß die in Gl. (7) unter dem ersten Integralzeichen auftretenden Größen stark von der Wellenlänge abhängen. Ohne Beschränkung auf ein engeres Spektralgebiet kann dies dazu führen, daß das Detektorsignal Φ nicht nur von der mittleren Schichtdicke \bar{h} auf der Meßfläche bestimmt wird, sondern auch von den Schwankungen $\Delta h(x, y)$ der Schichtdicke auf dieser Fläche wesentlich beeinflußt wird.

Die Bedingung (9) legt aber eine Beschränkung auf den Spektralbereich nahe, innerhalb dessen der Schwächungskoeffizient $\mu(\lambda)$ klein ist. Das Licht einer Glühlampe muß also durch Einsatz geeigneter Filter auf einen bestimmten, hinreichend schmalen Wellenlängenbereich begrenzt werden. Oder aber es müssen andere Lichtquellen eingesetzt werden.

Besonders schmalbandige Lichtemitter stellen Lumineszenzdiode (LED) dar /32, 33/. Ihr Einsatz für densitometrische Messungen wurde bereits vorgeschlagen /34, 35/, ein entsprechend ausgestattetes Auflicht-Densitometer bereits vorgestellt /35, 36/. Allerdings gibt es Lumineszenzdiode im sichtbaren Spektralbereich bisher nur für rote, gelbe und grüne Strahlung /32-35/. Im Bereich blauer und violetter Farben ist die Entwicklung noch nicht über das Laborstadium hinausgegangen /32-35/.

2.3.2 Ausführung der Meßeinrichtung

Eine Farbschichtdicken-Meßeinrichtung, die mit Hilfe von Licht eines Teiles des sichtbaren Spektrums arbeitet, kann in der Regel nur für eine bestimmte Farbe erstellt werden. Bei Beschickung der Walzen mit einer anderen Farbe müßte die Einrichtung dann umgerüstet und neu geeicht werden. Um dies zu vermeiden, wurden für die Untersuchungen - abgesehen von informativen Voruntersuchungen - stets nur eine bestimmte Buntfarbe eingesetzt. Dies war Cyan. Denn diese Farbe erwies sich für die Durchführung photoanalytischer Untersuchungen als am günstigsten /37/. Die Farbschichtdicken-Meßeinrichtung wurde deshalb für den Einsatz dieser Farbe ausgelegt und geeicht.

Die Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten dieser Farbe von der Wellenlänge ist in Abb. 8 wiedergegeben. Sie legt in Anbetracht der Bedingung (9) die Verwendung von Licht im blauen Spektralbereich mit einer Wellenlänge von $\lambda=480\text{nm}$ nahe. Da schmalbandige Lichtemitter für diesen Spektralbereich noch nicht erhältlich sind, wurde das Licht einer Halogenglühlampe durch Einsatz eines Farb- und eines Wärmefilters auf diesen Spektralbereich begrenzt.

Als ein besonders gut geeignetes Farbfilter erwies sich ein mit der betreffenden Druckfarbe gleichmäßig eingefärbtes Glasplättchen, wobei die Farbschicht im frisch aufgetragenen Zustand $3,67\text{ }\mu\text{m}$ betrug. Sein Transmissionsspektrum ist in Abb. 9 wiedergegeben. Ebenso befindet sich in dieser Abbildung das Transmissionsspektrum des Wärmefilters, das die Strahlung des infraroten Spektralbereiches von den Meßstellen fernhielt. Darüberhinaus ist in Abb. 9 auch das Transmissionsverhalten der Lichtleiter zu sehen, mit denen das Meßlicht jeweils zu den Meßstellen geleitet wurde.

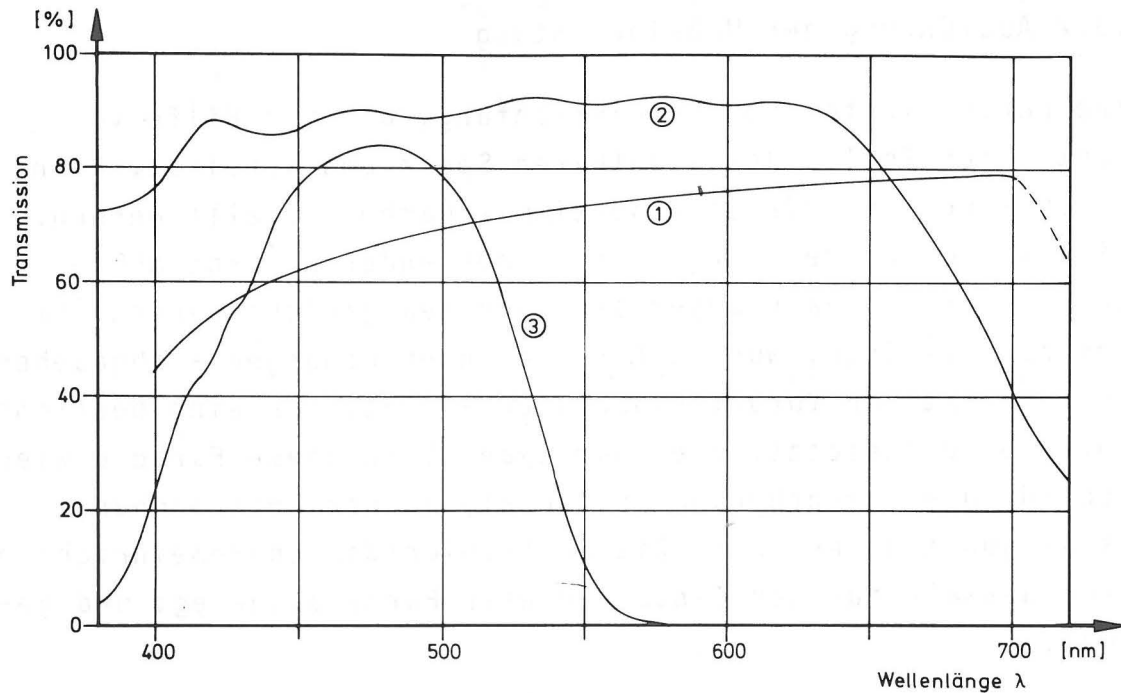


Abb. 9 Wellenlängenabhängigkeit der Transmission der verwendeten Lichtleiter (Kurve 1), des Wärmefilters (Kurve 2) und des Farbfilters (Kurve 3)

Die gesamte Meßeinrichtung einschließlich der elektronischen Verstärkungs- und Auswerteeinheiten ist schematisch in Abb.10 wiedergegeben. In dieser Abbildung ist links das Lampengehäuse mit den erwähnten Filtern sowie einem Hohlspiegel, der der Erhöhung der Lichtintensität an den Meßstellen dient, zu sehen. Das Licht gelangt über Lichtleiter zu insgesamt sechs Meßstellen auf der Glaswalze. Sie befinden sich in Laufrichtung der Glaswalze möglichst weit von der letzten Spaltstelle entfernt, um schon hierdurch eine Beeinflussung der Schichtdickenmessung durch die Oberflächenstruktur auf der Farbschicht gering zu halten. Zwei weitere Meßstellen, die stets farbfrei blieben, dienten der Intensitäts- und der Umfeldbeleuchtungskontrolle. Damit die Lichtleiter parallel zur Wandung der Glaswalze geführt werden können, befinden sich jeweils an ihrem Ende ein 90° -Umlenkprisma, das die aus den Lichtleitern austretende Strahlung umlenkt und durch die Glaswalzenwandung laufen läßt. Nach Durchstrahlung der Glaswalze

und einer evtl. vorhandenen Farbschicht wird das transmittierte Licht über ein weiteres 90° -Umlenkprisma und einen weiteren Lichtleiter jeweils auf einen Phototransistor geleitet.

Die Lichtleiterenden mit den Umlenkprismen sind für jede Meßstelle paarweise auf eine Metallgabel montiert. Diese Gabeln selbst befinden sich an einem dicken Stahlring, der auf seitlichen Stäben mit Präzisionsführungen (Fa. Sustan) bewegt werden kann. Dies erlaubt, insbesondere zum Zwecke der Reinigung, die gesamte Prismenanordnung um die Glaswalze von dieser in axialer Richtung wegzuschieben und ohne Mühe wieder zu installieren.

Als Phototransistoren wurden npn-Si-Darlington-Systeme eingesetzt. Diese bilden integrierte Bauelemente aus jeweils zwei gleichen Transistoren, von denen der eine bei offener Basis vom Lichtstrom optisch gesteuert wird und der andere als nachgeschalteter Verstärker wirkt. Da das abgegebene Signal eines Phototransistors eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit besitzt, wurden alle Phototransistoren zur Unterdrückung eines Temperaturganges auf konstanter Temperatur gehalten. Hierzu befanden sich die Transistoren jeweils in einer Messinghülse, die sich im Strom eines durch einen Thermostaten auf konstanter Temperatur gehaltenen Ölflusses befanden.

Die Strom- und Spannungsversorgung der Halogen-Glühlampe sowie die der Transistoren wurden durch geeignete Gleichspannungs-Konstanter sichergestellt.

Die photoelektrischen Meßsignale der einzelnen Transistoren wurden auf jeweils einen weiteren Verstärker gegeben. Jeder dieser Verstärker hatte die Aufgabe, die für den vollen Lichtstrom bei fehlender Farbschicht stark streuenden Meßsignale durch unterschiedliche Verstärkung auf einen für alle Transistoren einheitlichen Wert zu bringen. Da es sich bei

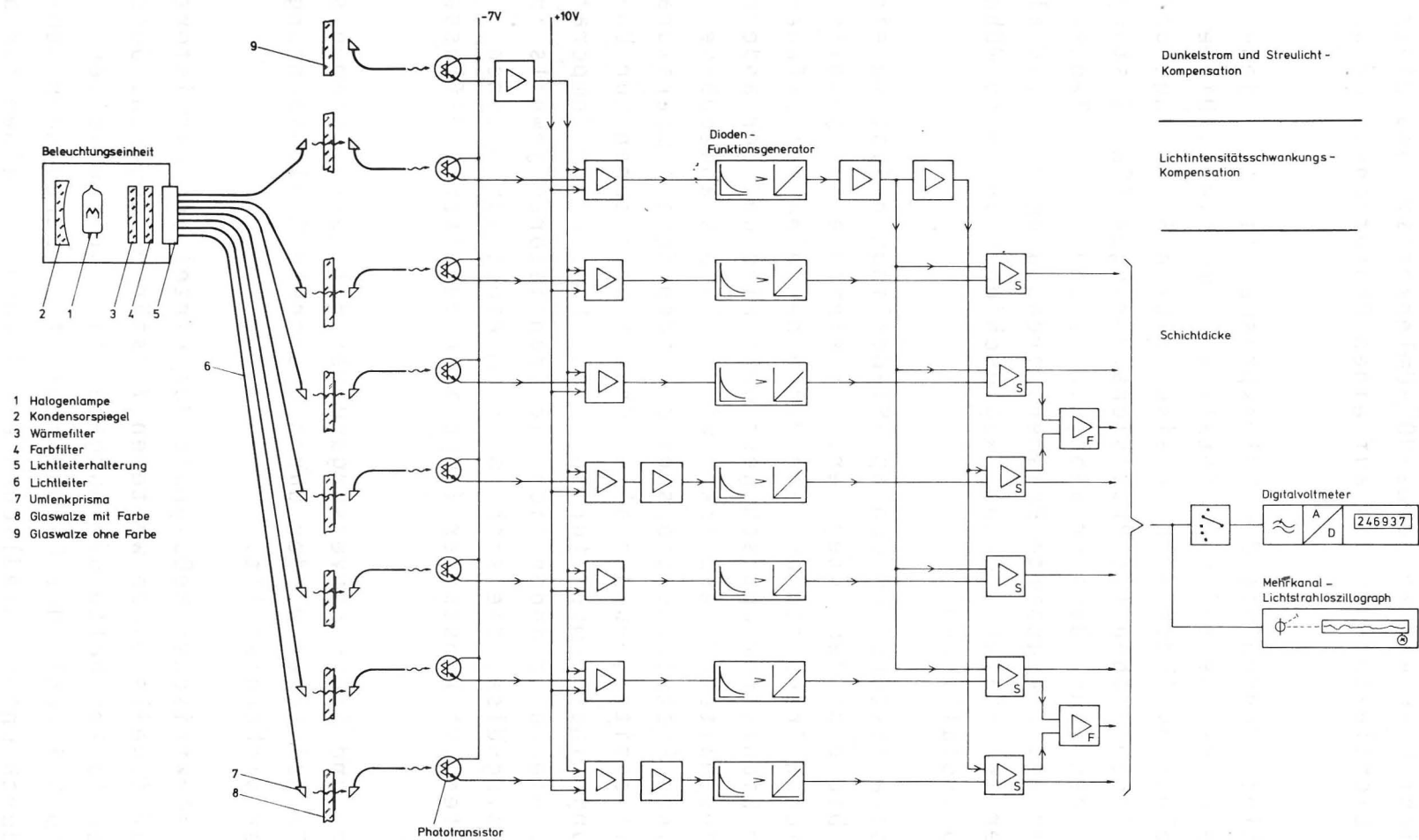


Abb. 10 Schematische Darstellung der gesamten Schichtdicken-Meßeinrichtung

diesen Verstärkern um invertierende Summierer handelte, konnte mit ihrer Hilfe auch eine Umfeldbeleuchtungskompensation ausgeführt werden und das Meßsignal für eine günstigere Verarbeitung in den nachfolgenden Diodenfunktionsgeneratoren linear verschoben werden. Die zum Betreiben der Verstärker notwendigen Rückkopplungs- und Eingangswiderstände sind in Abb. 10 der Übersichtlichkeit wegen nicht wiedergegeben worden. Bei diesen Widerständen handelt es sich wegen der notwendigen Abgleichungen durchweg um stetig variierbare Widerstände.

Die nach dieser Verstärkungsstufe erhaltenen Signale der Phototransistoren in Abhängigkeit von der Farbschichtdicke sind in Abb. 11 wiedergegeben. Sie lagen für alle eingesetzten Transistoren jeweils innerhalb des zu einer Farbschichtdicke angegebenen Wertebereiches.

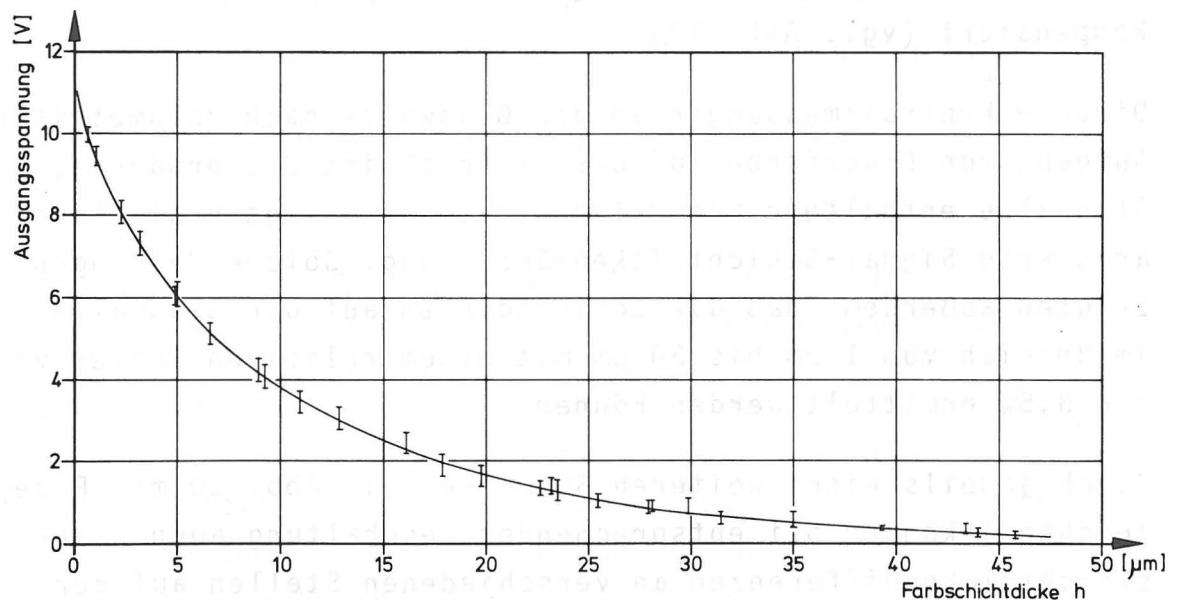


Abb. 11 Abhängigkeit der Phototransistor-Signale von der Farbschichtdicke vor der Linearisierung durch Funktionsgeneratoren

Die Messungen, die der Eichung der Meßeinrichtung dienten, erfolgten unter Verwendung von gleichmäßig eingefärbten Glas-

plättchen, bei denen die Dicke der aufgetragenen Farbe gravimetrisch unmittelbar nach Aufbringung der Farbe, also im frischen Zustand, bestimmt wurde.

Der in Abb. 11 zu sehende Zusammenhang zwischen photoelektrischem Signal und Farbschichtdicke ist nicht linear. Mit Hilfe dieser Eichkurve wurde in den Diodenfunktionsgeneratoren die Linearisierung der Signal-Schichtdicken-Beziehung durchgeführt. Dabei wurden zur Erhöhung der Genauigkeit die für einen Transistor ständig aufgetretenen, systematischen Abweichungen von Meßpunkten von der in Abb. 11 eingezeichneten Mittelkurve beim Abgleichen des betreffenden Diodenfunktionsgenerators berücksichtigt. Der diesen Generatoren jeweils nachfolgende Verstärker (in Abb. 10 mit S bezeichnet) lieferte als Ausgangssignal den linearen Zusammenhang zwischen Signal und Farbschichtdicke. Zusätzlich werden mit Hilfe dieser Verstärker jeweils über eine Summiererschaltung die Intensitätsschwankungen des von der Halogen-Glühlampe emittierten Lichtes kompensiert (vgl. Abb. 10).

Direkte Kontrollmessungen an der Glaswalze nach volumetrischer Aufgabe von Druckfarbe auf das im Abschnitt 2.1 erwähnte, die Glaswalze enthaltene Vierwalzensystem bestätigten die linearisierte Signal-Schichtdicken-Beziehung. Solche Messungen zeigten außerdem, daß die Schichtdicken auf der Glaswalze im Bereich von 1 μm bis 30 μm mit einem relativen Fehler von nur 3,5% ermittelt werden können.

Durch jeweils einen weiteren Summierer (in Abb. 10 mit F bezeichnet) können bei entsprechender Beschaltung auch Farbschichtdickendifferenzen an verschiedenen Stellen auf der Glaswalze bestimmt werden. Somit sind, wenn zwischen zwei Meßstellen eine farbabnehmende Walzenspaltstelle liegt, Angaben über die Farbflußrichtung möglich. Da es sich hierbei um eine Differenzmessung handelt, sind solche Angaben jedoch mit einem größeren Fehler behaftet, insbesondere bei großen Farbschichtdicken auf den Walzen, aber einem geringen Farbfluß zwischen ihnen.

2.4 Temperaturmessung

Die Temperatur der Gummiwalzenoberfläche wurde berührungslos mit einem Infrarot-Strahlungsthermometer mit Bolometer-Empfänger gemessen. Ein solches Gerät erfaßt die vom Meßobjekt ausgesandte Infrarotstrahlung, deren Intensität und spektrale Verteilung den Strahlungsgesetzen entsprechend (vgl. z. B. Gl. (10)) mit der Temperatur des Meßobjektes in Beziehung steht /30/. Als Emissionsfaktor wurde stets $\epsilon=0,90$ angenommen, gleichgültig, ob die Gummiwalzenoberfläche frei oder mit einer dünnen Öl- bzw. Druckfarbenschicht bedeckt war. Diesen Wert legen die Ausführungen in der Betriebsanleitung des Gerätes für die genannten Substanzen nahe. Er entspricht innerhalb des Streubereiches von $\Delta\epsilon=0,05$ dem Wert früherer Messungen /38, 39/, nach denen kein nennenswerter Unterschied im Emissionsfaktor einer nackten und einer mit Druckfarbe bedeckten Gummioberfläche gefunden werden konnte.

- Die Meßgenauigkeit der Temperaturmessung betrug $\pm 1^{\circ}\text{C}$, im Falle der Feststellung von Temperatur-Änderungen sogar nur $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

2.5 Optik für die photoanalytischen Untersuchungen

Die optische Anordnung für die photoanalytischen Untersuchungen ist schematisch in Abb. 12 wiedergegeben.

Die für photographische Aufnahmen notwendige Beleuchtung der Spaltzone zwischen einer Gummi- und der Glaswalze wurde mit einer Kurzzeit-Blitzlampe durch Auslösung einer Hochspannungsfunkenentladung in einer Argon-Hochdruckatmosphäre gewonnen. Mit dieser Lampe werden Blitzdauern von etwa $1\ \mu\text{s}$ erreicht. Solche kurze Blitzdauern sind unbedingt erforderlich, um bei Walzengeschwindigkeiten von 1 m/s und mehr, nachvergrößerte Bilder von der Spaltzone ohne Bewegungsunschärfe zu erhalten.

Zur Ausleuchtung der Spaltzone wurde das in der Blitzlampe erzeugte Licht benutzt, das durch ein besonders errichtetes

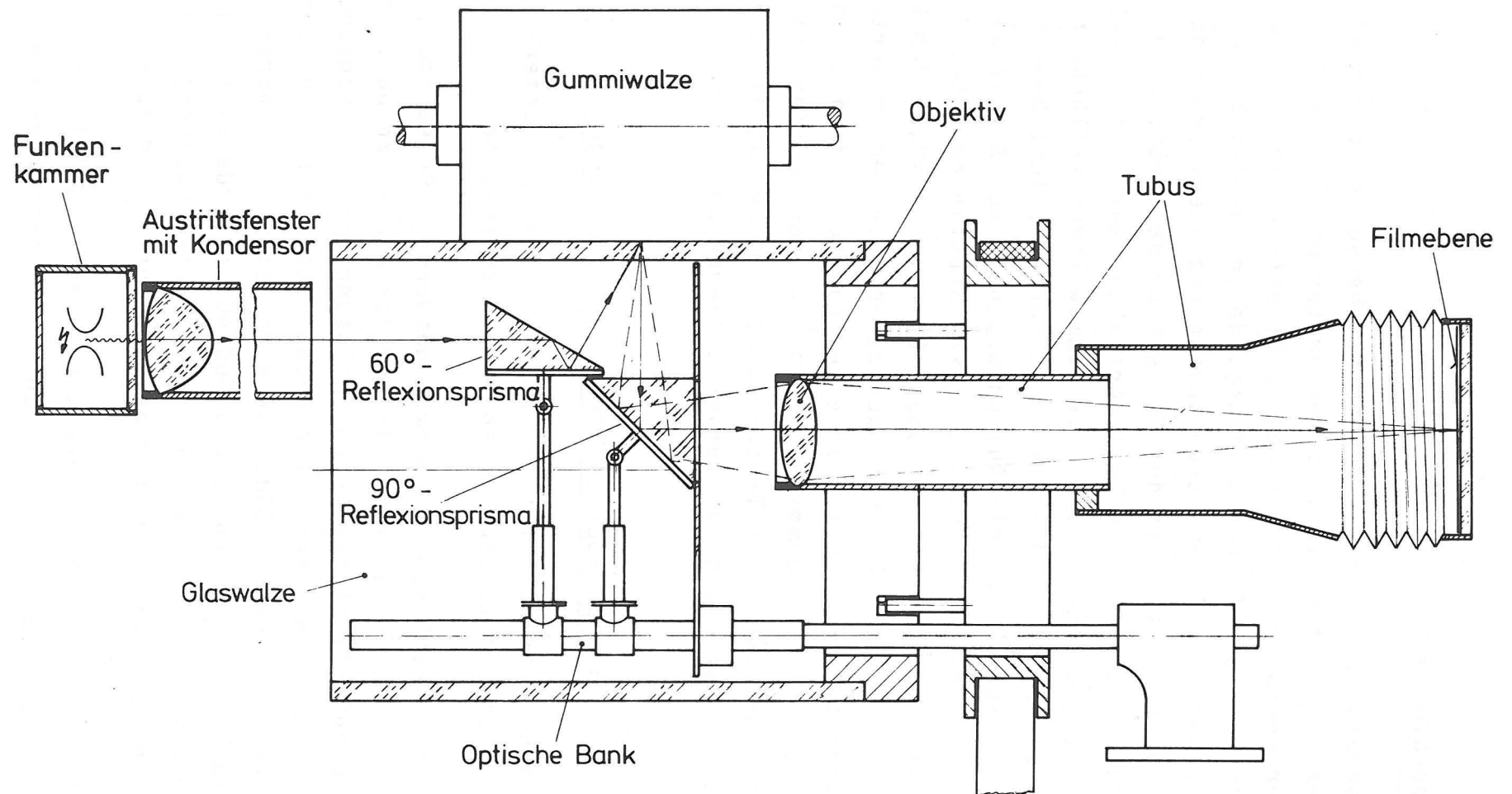


Abb. 12 Optik für die photoanalytischen Untersuchungen

Austrittsfenster mit justierbarer Kondensor-Einrichtung geleitet wurde. Dieses Licht gelangte durch ein Reflexionsprisma nach BAUERFEIND, das die Strahlung um einen Winkel von 60° ablenkte, durch die Wandung der Glaswalze in die Spaltzone zwischen dieser Walze und der beigestellten Gummiwalze. Die so beleuchtete Spaltzone wurde über ein 90° -Umlenk-Reflexionsprisma und ein Vergrößerungsobjektiv als Aufnahmeobjektiv auf die lichtempfindliche Schicht des photographischen Aufnahmematerials abgebildet. Die beiden Prismen sowie eine Blende zur Verhinderung direkter Lichteinstrahlung aus Richtung der Blitzlampe in das Aufnahmeobjektiv sind zusammen auf einer optischen Bank montiert und können mit dieser ohne Änderung der gegenseitigen Anordnung parallel zu den Walzenachsen verschoben werden.

Als photographische Registriereinrichtung wurde einerseits eine für diese Untersuchungen umgerüstete Aufnahmekamera auf einer optischen Bank, andererseits eine ebenfalls den geometrischen Abbildungserfordernissen angepaßte Registrierkamera verwendet. Letztere ist auf dem Ansichtsbild des Versuchsstandes in Abb. 1 auf der rechten Seite zu sehen. Mit dem zuerst genannten Gerät konnten Negative von Einzelaufnahmen im Format $6,5 \times 9 \text{ cm}^2$ erhalten werden. Für die linearen Abmessungen der Abbildung auf die lichtempfindliche Schicht gegenüber den tatsächlichen Abmessungen im Walzenspalt wurde eine Vergrößerung bis zum Achtfachen gewählt. Das zweite Gerät wurde insbesondere zur Durchführung von Serien zeitlich dicht aufeinanderfolgender Einzelaufnahmen eingesetzt. Da hier die Abbildung auf einen 24 mm breiten Kleinbildfilm erfolgte, betrug der lineare Vergrößerungsmaßstab auf den Negativen nur 2.5:1. Als Aufnahmematerial wurde stets Filmmaterial der Empfindlichkeitsklasse 27 DIN eingesetzt, das sich trotz der hohen Lichtempfindlichkeit durch die Feinkörnigkeit des entwickelten Negativbildes auszeichnete.

Die photoanalytischen Untersuchungen erfolgten, wie aus den vorstehenden Ausführungen hervorgeht, im von der Spaltzone

reflektierenden Licht; die erhaltenen photographischen Bilder stellen somit Auflichtaufnahmen dar. Deshalb und wegen der kurzen Belichtungszeit von etwa 10^{-6} s ergaben sich trotz der Verwendung hochempfindlichen Filmmaterials gewisse Schwierigkeiten, eine stets ausreichende Belichtung zu erlangen.

Neben der Erstellung photographischer Aufnahmen von der Spaltzone zwischen einer Gummi- und der Glaswalze wurde die Spaltzone auch - insbesondere bei Walzenstillstand - visuell beobachtet. Hierzu wurde die photographische Aufnahmeeinrichtung durch eine Lupe ersetzt, die das Bild von der Spaltzone für das Auge zusätzlich vergrößerte. Der beim visuellen Arbeiten gewonnene Eindruck war für die Interpretation der gewonnenen Bilder oftmals sehr hilfreich.

3. P H O T O A N A L Y T I S C H E U N T E R - S U C H U N G E N

3.1 Optische Grundlagen der Lichtreflexion

Im letzten Abschnitt wurde bereits dargelegt, daß die photoanalytischen Untersuchungen im von der Spaltzone zwischen einer Gummiwalze und der Glaswalze reflektierten Licht erfolgten. Die Reflexion in der Spaltzone kann regulär oder diffus erfolgen, je nachdem, welche optischen Eigenschaften die in der Spaltzone befindlichen Substanzen besitzen; im allgemeinen Fall können beide Reflexionsarten nebeneinander auftreten.

Eine reguläre Reflexion entspricht einer Spiegelung. Sie liegt dann vor, wenn der Winkel des einfallenden Lichtstrahles zur Normalen der reflektierenden Grenzflächen dem Betrage nach gleich dem Winkel des reflektierten Strahles zu dieser Normalen ist und wenn Einfalls- sowie Reflexionsstrahl zusammen mit der Normalen auf die Reflexionsfläche eine Ebene bilden. Wird dagegen aus einer bestimmten Richtung einfallendes Licht in alle Richtungen des Halbraumes reflektiert, so spricht man von diffuser Reflexion oder Streureflexion /40/. Sie kann an einer rauen Grenzfläche zweier Phasen auftreten oder an in einem Medium enthaltenen optischen Inhomogenitäten hervorgerufen werden.

Die reguläre Reflexion läßt sich mit Hilfe der Fresnelschen Gleichungen vollständig beschreiben /40, 41/. Unter Berücksichtigung des Snelliusschen Brechungsgesetzes ergibt sich aus den Fresnelschen Gleichungen der Anteil des reflektierten Lichtes an der insgesamt eingestrahltten Lichtmenge. Dieser Anteil setzt sich im allgemeinen aus zwei voneinander verschiedenen Termen, entsprechend den beiden Komponenten des Schwingungszustandes der Strahlung, parallel und senkrecht zur Einfallsebene zusammen. Jeder dieser Terme ist eine Funktion des Einfallwinkels und der Brechungsindices der beiden

die Grenzfläche bildenden Medien. Die Brechungsindices sind für isotrope, nicht absorbierende Substanzen reell. Dagegen wird absorbierenden Substanzen ein im allgemeinen noch vom Einfallswinkel abhängiger komplexer Brechungsindex zugeschrieben, dessen Imaginärteil dem linearen Absorptionskoeffizienten direkt proportional ist.

Diese Ausführungen zeigen, daß die reguläre Reflexion in eigentlich recht komplizierter Form vom Einfallswinkel der Strahlung und den optischen Eigenschaften der beiden die reflektierende Grenzfläche bildenden Medien abhängt.

Nur im speziellen Fall senkrechter Lichteinstrahlung läßt sich die reflektierte Lichtintensität relativ einfach angeben:

$$R(\lambda) = \frac{(n_2(\lambda) - n_1(\lambda))^2 + K_2(\lambda)^2}{(n_2(\lambda) + n_1(\lambda))^2 + K_2(\lambda)^2} \quad (11)$$

wobei $n_1(\lambda)$ und $n_2(\lambda)$ die im allgemeinen wellenlängenabhängigen Brechungsindices der beiden die Grenzfläche bildenden Medien und $K_2(\lambda)$ der zum Medium mit $n_2(\lambda)$ gehörige Absorptionskoeffizient ist ($K_1(\lambda)=0$). Auch wenn für das reflektierte Licht vielfach eine Gleichung in dieser oder ähnlicher Form angegeben wird, darf dies nicht darüber hinwegtäuschen, daß Gl. (11) nur für einen speziellen, relativ einfach zu beschreibenden Fall der Lichtreflexion gilt.

Während sich also die reguläre Reflexion von Licht an makroskopischen Phasengrenzen mit Hilfe der Fresnelschen Gleichungen vollständig beschreiben läßt, gibt es für die diffuse Reflexion eines auf eine Phasengrenze einfallenden, gerichteten Lichtstrahls keine analoge allgemein gültige Theorie /41/.

Erfolgt die Reflexion direkt an der Grenzfläche zwischen zwei optisch verschiedenen Medien und ist die Grenzfläche rau,

wobei die Dimensionen der Elementarflächen in der Oberfläche zwar groß gegen die Wellenlänge, jedoch klein gegen den Querschnitt des einfallenden Strahlenbündels sind, so kann man annehmen, daß an jeder zur makroskopischen Grenzfläche beliebig geneigten Elementarfläche gemäß den Fresnelschen Gleichungen reguläre Reflexion auftritt. Wenn jedoch die Dimensionen der Elementarflächen nur wenig größer als die Wellenlänge sind und damit mit dieser vergleichbar werden, dann machen sich neben der Reflexion auch Beugungserscheinungen bemerkbar. In beiden Fällen ergibt sich eine Reflexion, die zwar makroskopisch als diffus angesehen werden mag, keineswegs aber als isotrop gelten kann.

Genau dieses Reflexionsverhalten zeigen - wie noch näher dargelegt werden wird - die bei den photoanalytischen Untersuchungen eingesetzten Gummiwalzen, wenn deren Oberflächen an Luft grenzen.

Im allgemeinen wird nur ein Teil der einfallenden Strahlung an der Grenzfläche zweier optisch verschiedener Medien reflektiert, der restliche Anteil der Strahlung durchdringt diese Grenzfläche und wird gebrochen im zweiten Medium weiterlaufen. Absorbiert dieses Medium das Licht, so wird der Strahl mit seinem Fortschreiten entsprechend geschwächt. Wenn sich aber in diesem Medium optische Inhomogenitäten befinden, so wird das Licht an diesen Inhomogenitäten durch Streuung aus seiner Richtung abgelenkt. Die Streuprozesse werden mehrfach stattfinden, wenn die Abstände der Inhomogenitäten zwar groß gegen ihre Dimensionen, aber klein gegen die Wellenlänge des Lichtes sind /41/. Ein Teil des in das streuende Medium eingedrungenen Lichtes kann dann in das erste Medium remittiert und als diffuse Reflexion registriert werden.

Eine derartige Reflexionsstreuung ist wohl allen heute praxisüblichen Druckfarben, die Licht remittieren, eigen.

3.2 Lichtreflexion im Walzenspalt

Die Durchführung von photoanalytischen Untersuchungen über die Vorgänge und Zustände in einem Walzenspalt setzt die Kenntnis des Lichtreflexionsverhaltens der diesen Spalt bildenden und der sich in ihm befindlichen Substanzen, wie Druckfarbe oder andere Flüssigkeiten, voraus. Eine Reihe von Untersuchungen diente der Ermittlung dieser Kenntnisse. Hierbei wurden die für die Photoanalyse wesentlichen optischen Eigenschaften der verschiedenen Medien in einem Walzenspalt gewonnen. Die geometrische Anordnung der Optik entsprach dabei - soweit nicht anders angegeben - der für die eigentlichen photoanalytischen Untersuchungen, wie sie im Abschnitt 2.5 beschrieben ist. Darüber hinaus wurde auch die Zweckmäßigkeit einer Beleuchtung des Walzenspaltes mit polarisiertem Licht geprüft.

3.2.1 Lichtreflexion im Spalt nackter Walzen

Da die Breite des Walzenspaltes stets klein gegenüber den beiden Walzenradien ist, kann man die zylindrische Krümmung der Glaswalze im Bereich des Walzenspaltes vernachlässigen. Die Glaswalze kann also für die Darstellung des Lichtstrahlverlaufes mit guter Näherung als eine ebene, gegenüber der Wellenlänge des Lichtes dicke Platte mit parallelen Begrenzungsflächen aufgefaßt werden. Auf diese Platte fällt dann das Licht unter einem Winkel von etwa 30° ein. Zur photoanalytischen Untersuchung trägt jedoch nur das in einen kleinen Raumwinkelbereich um die Normale zur Glasoberfläche remittierte Licht bei, das auch durch die Blendenöffnung des Aufnahmeobjektives und der nachfolgenden Blenden gelangt. Aufgrund dieser geometrischen Anordnung der Optik gelangte kein an der Innen- oder Außenfläche der Glaswalze regulär reflektiertes Licht in das Aufnahmeobjektiv. Die Photoanalyse ist deshalb frei von solchen von einer Phasengrenze mit der Glaswalze herrührenden, störenden Reflexionseinflüssen.

Die bei den photoanalytischen Untersuchungen eingesetzten Gummiwalzen waren von dunkel blau-grauer Färbung, was auf Absorption des an der Oberfläche in das Innere der Gummiwalze gebrochenen Lichtes schließen läßt. Allerdings stellt der viskoelastische Belag einer Gummiwalze mikroskopisch keine homogene Substanz dar, denn neben dem viskoelastischen Polymer enthält ein solcher Belag in aller Regel noch gewisse Beimengungen an kleinen Feststoffteilchen. In Anbetracht der Lichtabsorption im Belag und des kleinen Prozentsatzes solcher Beimengungen kann jedoch der viskoelastische Belag für die hier durchzuführenden Betrachtungen mit sehr guter Näherung als optisch homogen angesehen werden, sofern sich die Feststoffteilchen nicht unmittelbar an der Oberfläche befinden.

Im voranstehenden Abschnitt wurde bereits erwähnt, daß die bei den Untersuchungen eingesetzten Gummiwalzen bei Einfall von Licht auf die jeweils gegen Luft grenzende Oberfläche anisotrope Reflexion zeigen. In Abb. 13 sind zwei Bilder mit der Ansicht einer solchen Gummiwalze durch den Glaszylinder zu sehen.

Zur Markierung eines bestimmten Bereiches auf der rauhen Oberfläche war diese mit einigen Lochbohrungen versehen, die in den Bildern der Abb. 13 deutlich zu sehen sind. Aufgrund des Schattens in den Löchern läßt sich in beiden Bildern die Richtung des einfallenden Lichtes leicht erkennen. Beim oberen Bild der Abb. 13 erfolgte die Lichteinstrahlung entsprechend der Darstellung in Abb. 12 und den oben gegebenen Erläuterungen. Das untere Bild wurde dagegen mit seitlicher Beleuchtung entlang einer Kreissekante der zylindrischen Glaswalze gewonnen. Bei Aufnahme der beiden Bilder berührten sich die Walzen nicht. Deutlich erkennt man auf beiden Bildern die Oberflächen-Rauhigkeit der Gummiwalze, die aufgrund der unterschiedlichen Beleuchtung zu differenzierten Bildern infolge regulärer Reflexion an gegenüber der makroskopischen Oberfläche geneigten Elementarspiegelflächen führte. Messungen

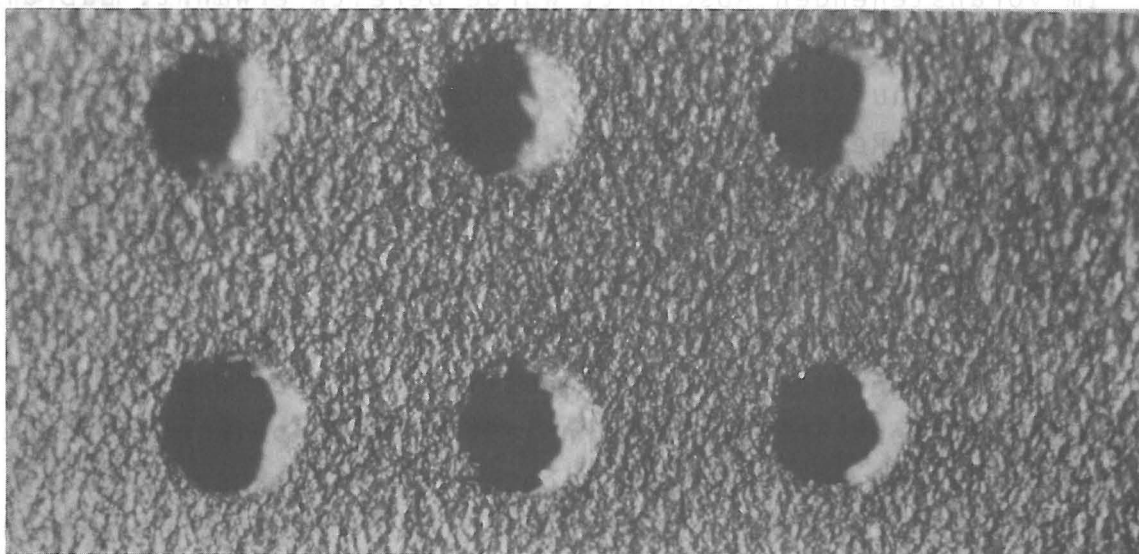
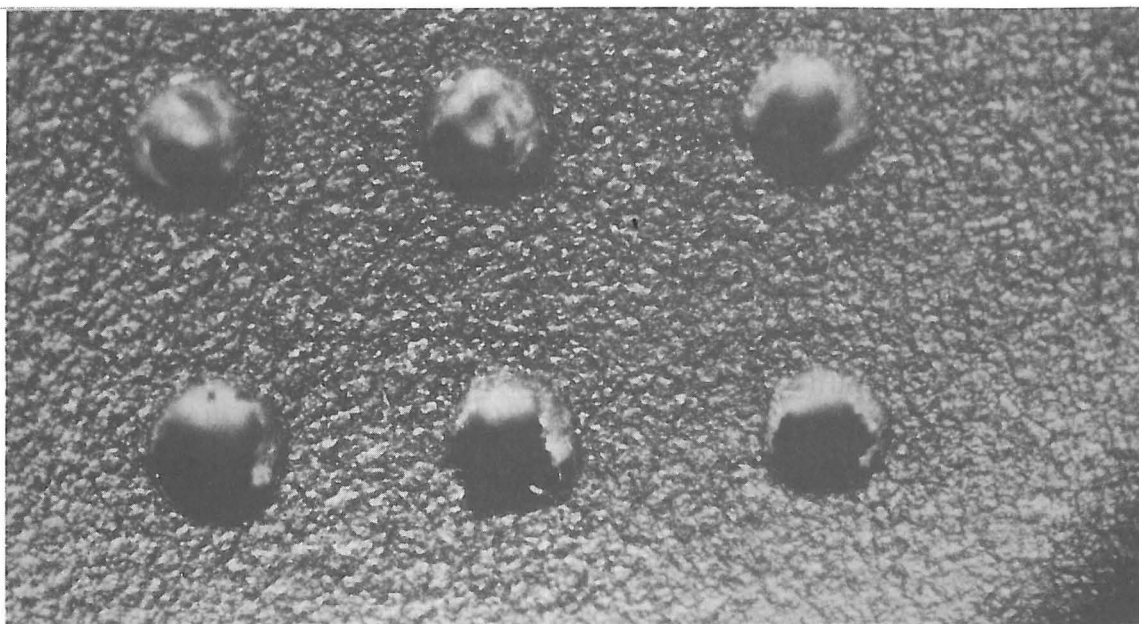


Abb. 13 Ansicht der Gummioberfläche durch die Glaswalze an der Stelle der Lochbohrungen, wenn Gummiwalze und Glaswalze nicht zueinander beigestellt sind.

Bild oben: Beleuchtung entsprechend der Darstellung in Abb. 12

Bild unten: seitliche Beleuchtung

M = 20:1

der Oberflächen-Rauhigkeiten von Gummiwalzen mit Hilfe eines Perth-0-Meters zeigten Spitze-Spitze-Abstände von bis zu etwa 15 μm .

Daß es sich bei den Reflexionen tatsächlich um reguläre Reflexion handelt, konnte durch Untersuchung des Polarisationszustandes des reflektierten Lichtes bei Einstrahlung linear polarisierten Lichtes bestätigt werden. Denn bei nicht zu starker Absorption ändert sich der lineare Polarisationszustand des Lichtes praktisch nicht durch die Reflexion, und die Polarisationssebene wird bei Azimutwinkeln von 0° oder 90° bezogen auf die makroskopische Oberfläche nicht gedreht /41/. Nur an einigen wenigen Stellen der Gummioberfläche trat offensichtlich eine andersartige Reflexion auf. Das von diesen Stellen reflektierte Licht gelangte bei Azimutwinkeln von 0° oder 90° durch einen zu einem Polarisator gekreuzten Analysator. Dieser befand sich im Strahlengang vor der Gummiwalze. Dadurch wurde eine optische Anordnung zur Auslöschung linear polarisierten Lichtes geschaffen. Die nähere Untersuchung unter einem Mikroskop legte die Vermutung nahe, daß es sich hierbei um Ansammlungen submikroskopischer Teilchen an der Oberfläche handelt, die linear polarisierte Strahlung entsprechend der Darstellung in /41/ durch Vielfachstreuung depolarisiert zurückstrahlen. Solche Teilchenansammlungen können wohl durch die bereits erwähnten Beimengungen kleiner Feststoffe in dem viskoelastischen Gummibelag hervorgerufen sein. Dagegen scheiden auf der Gummiwalze zurückgebliebene Pigmente aus Farbresten offensichtlich aus, da die betreffenden Reflexionen ungefärbt waren.

Da bei den im Rahmen der photoanalytischen Untersuchungen eingesetzten, dunklen Gummiwalzen solche Stellen depolarisierter diffuser Reflexion nur vereinzelt auftraten, kann von ihnen im weiteren abgesehen werden.

Bei einer Beistellung der viskoelastischen Gummiwalze an die dagegen vergleichsweise starre Glaswalze von etwa 0,4 mm

ebnet sich die auf der Gummiwalze vorhandene Oberflächen-Rauhigkeit nicht voll ein, obwohl die Höhenunterschiede in der Oberflächenstruktur wesentlich kleiner sind als der Betrag der Beistellung. Diesen Sachverhalt zeigen deutlich die beiden in Abb. 14 zu sehenden Bilder, die wie die Bilder in Abb. 13 mit unterschiedlicher Beleuchtung aufgenommen wurden. Vergleicht man das obere bzw. das untere Bild der Abb. 14 mit dem entsprechenden der Abb. 13, so erkennt man deutlich eine gewisse, aber nicht vollständige Einebnung der Oberfläche und eine Abflachung der Oberflächen-Rauhigkeiten infolge der Beistellung der Gummiwalze an die Glaswalze.

Die gleiche Aussage wurde auch für andere Gummiwalzen gefunden, selbst wenn deren topologische Oberflächenstruktur offensichtlich ganz anders war. Man kann also davon ausgehen, daß das hier dargelegte Ergebnis für viele oder gar alle viskoelastischen Farbwerkswalzen Gültigkeit besitzt.

Auch bei Beistellung der Gummiwalze an die Glaswalze werden die Reflexionen an der Gummiwalze praktisch nur durch reguläre Reflexion an Elementarspiegelflächen der Oberfläche hervorgerufen. Man muß sich hierzu vergegenwärtigen, daß die optischen Eigenschaften der reflektierenden Grenzflächenelemente durch die Beistellung unverändert geblieben sind: Die Reflexionen finden nach wie vor an den Grenzflächen des viskoelastischen Belages zu Luft statt.

3.2.2 Lichtreflexion im firnisgefüllten Walzenspalt

Die Situation ändert sich jedoch wesentlich, wenn der Spalt zwischen der Gummi- und der Glaswalze mit einem flüssigen durchsichtigen Medium gefüllt wird. Beschickt man nämlich den Walzenspalt mit Firnis, dem Druckfarbenbindemittel, oder mit Walzenreinigungsmittel oder aber auch mit Wasser, so verschwinden die regulären Reflexionen an der Gummiwalzenoberfläche praktisch vollständig und an den dunklen bzw. schwarzen Gummiwalzen läßt sich keine Oberflächenstruktur

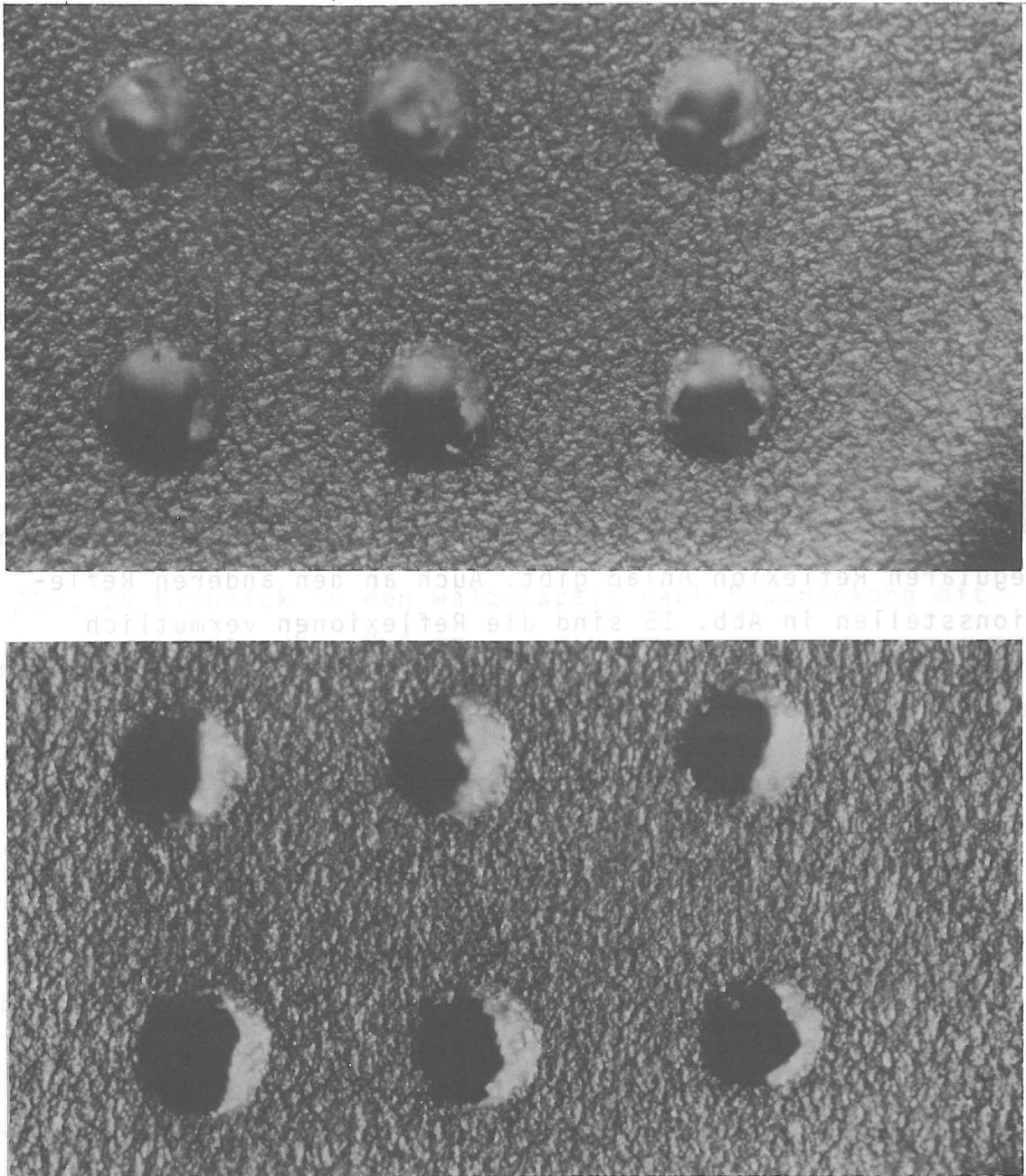


Abb. 14 Ansicht der Gummioberfläche durch die Glaswalze an der Stelle der Lochbohrungen, wenn die Gummiwalze etwa 0,4 mm an die Glaswalze beigestellt ist.

Bild oben: Beleuchtung entsprechend der Darstellung in Abb. 12

Bild unten: seitliche Beleuchtung

M = 20:1

mehr erkennen. Dies ist deutlich in Abb. 15 zu sehen, die den gleichen Oberflächenbereich der Gummiwalze bei gleicher Beistellung und Beleuchtung wie in Abb. 14 oben zeigt, nur daß hier der Walzenspalt mit Firnis beschickt wurde. Die im Bild zu erkennenden Reflexionen lassen sich als reguläre Reflexionen an Grenzflächen zwischen Firnis und Luft erklären. Besonders leicht ist dies an den Reflexionsstellen am unteren Rand der Löcher auf der Gummiwalzenoberfläche zu erkennen. Diese Löcher sind nicht mit Firnis voll gefüllt, sodaß sich in jedem Loch eine Firnis-Luft-Grenzfläche befindet, die entsprechend der schematischen Darstellung in Abb. 16 zu einer mit der optischen Anordnung registrierbaren regulären Reflexion Anlaß gibt. Auch an den anderen Reflexionsstellen in Abb. 15 sind die Reflexionen vermutlich durch Firnis-Luft-Grenzflächen aufgrund von Lufteinschlüssen im Firnis hervorgerufen worden.*)

Ursache der Unterdrückung regulärer Reflexionen an der Gummi-oberfläche bei Füllung des Walzenspaltes mit den oben genannten Flüssigkeiten ist die mit dieser Füllung bewirkte Änderung der optischen Eigenschaften des an die reflektierenden Elementarspiegelflächen der Gummioberfläche grenzenden Mediums gegenüber dem Fall des mit Luft gefüllten Walzenspaltes. Diese Änderung führt zu einer Angleichung der Realteile der Brechungsindices der beiden die Grenzfläche jeweils bildenden Medien. Sie führt somit bei nicht zu starker Absorption des als homogen angesehenen viskoelastischen Mediums gemäß den Fresnelschen Gleichungen zu einer wesent-

*) Allerdings kann die an wenigen Stellen der Gummioberfläche auftretende, depolarisierte diffuse Reflexion, die gewissen Ansammlungen submikroskopischer Teilchen auf der Gummi-oberfläche zugeschrieben wurde, bei Füllung des Walzenspaltes mit einer Flüssigkeit in einer noch erkennbaren Stärke erhalten bleiben. Einigen, allerdings sehr wenigen, hellen Stellen in Abb. 15 kann deshalb auch diese Reflexion zugrunde liegen.

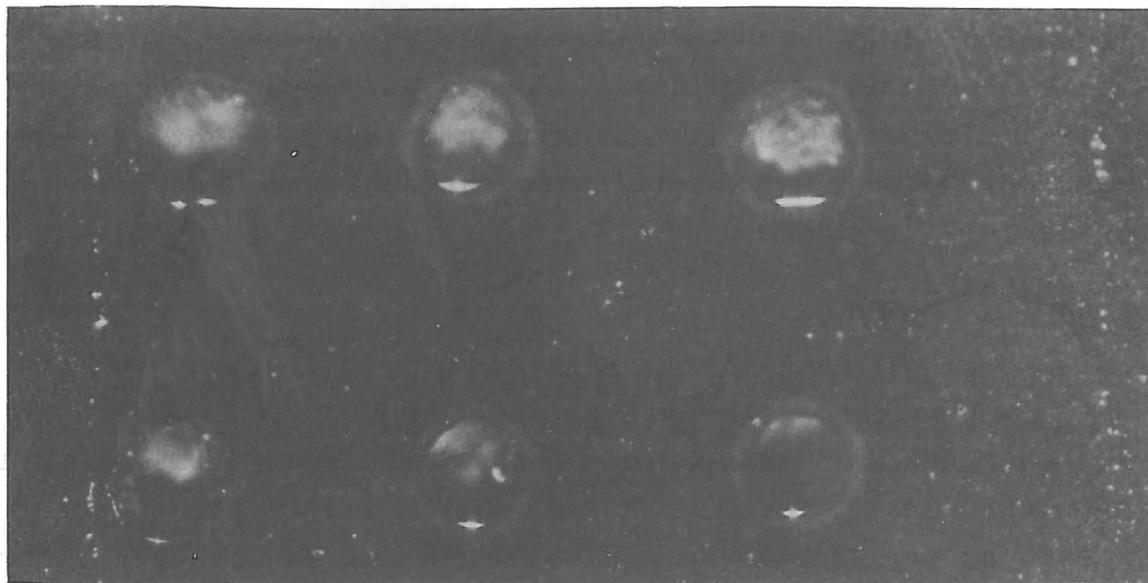


Abb. 15 Einblick in den Walzenspalt nach Beschickung mit Firnis; $b = 0,4 \text{ mm}$

$M = 20:1$

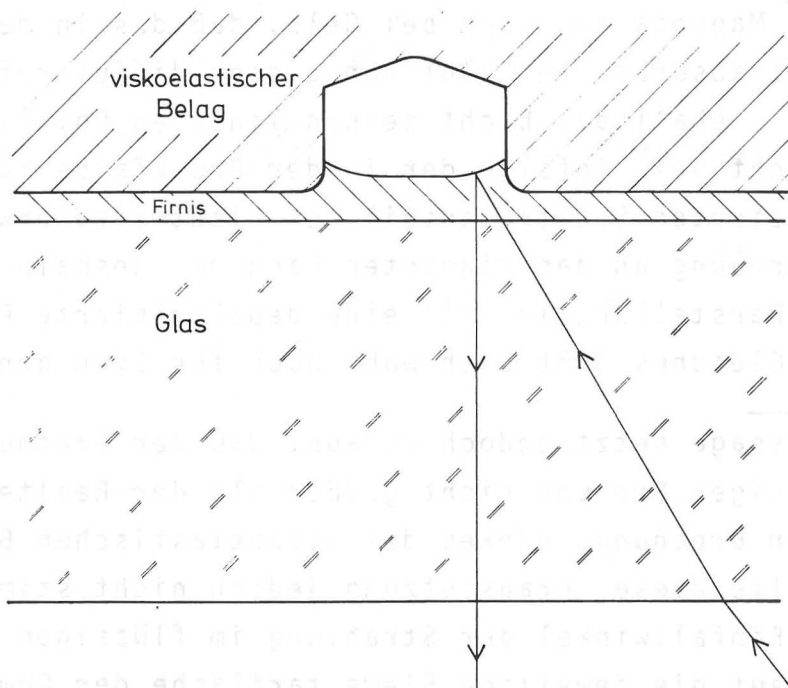


Abb. 16 Schematische Darstellung direkter Strahlungsreflexion an einer freien Oberfläche des Firnis

lichen Erniedrigung des Reflexionskoeffizienten der Grenzfläche.^{x)} Die Situation der Reflexionsunterdrückung im flüssigkeitsgefüllten Walzenspalt entspricht eigentlich genau der, die jeder Kraftfahrzeugfahrer kennt: Feuchter Straßenbelag erscheint in aller Regel wesentlich dunkler als trockener.

3.2.3 Lichtreflexion im farbgefüllten Walzenspalt

Wie sehen nun aber die Reflexionsverhältnisse im Walzenspalt aus, wenn dieser mit Druckfarbe gefüllt ist? Hierzu wurden Untersuchungen mit den drei Buntfarben der Europaskala einer kommerziellen Offset-Druckfarbenserie durchgeführt. Die zur gleichen Serie zugehörige Schwarzfarbe wurde nicht näher untersucht, da sie naturgemäß keine für photoanalytische Untersuchungen hinreichenden Lichtreflexionen erwarten ließ.

Bei Einstrahlung linear polarisierten Lichtes zeigte sich sowohl bei Magenta als auch bei Gelb, daß das in der Druckfarbe nicht absorbierte Licht von dieser diffus reflektiert wird. Dabei behält das Licht seinen linearen Polarisationszustand nicht bei. Infolge der in der Druckfarbe für den nichtabsorbierten Spektralanteil des Lichtes zu erwartenden Vielfachstreuung an den Pigmenten kann man deshalb entsprechend der Darstellung in /41/ eine depolarisierte Reflexion annehmen. Gleiches läßt sich wohl auch für Cyan annehmen,

^{x)} Diese Aussage setzt jedoch voraus, daß der Brechungsindex des flüssigen Mediums nicht größer als der Realteil des komplexen Brechungsindex des viskoelastischen Belages ist. Sollte diese Voraussetzung jedoch nicht stimmen, so muß der Einfallswinkel der Strahlung im flüssigen Medium bezogen auf die jeweilige Elementarfläche der Gummioberfläche kleiner sein als der Winkel der sich - bei Vernachlässigung der Absorption im viskoelastischen Belag - ergebenden Totalreflexion.

obwohl analoge Untersuchungen aufgrund der relativen Unempfindlichkeit des Auges für das von Cyan remittierte Licht im blauen Spektralbereich erschwert wurden.

Die Depolarisierung des von Druckfarbe remittierten Lichtes dürfte wohl bei allen, heute praxisüblichen Druckfarben anzutreffen sein und allgemein unabhängig vom Polarisationszustand des auf die Druckfarbe auftreffenden Lichtes sein. Es erscheint deshalb wenig sinnvoll, die photoanalytischen Untersuchungen des Verhaltens von Druckfarbe in Walzenspalten mit einem bestimmten Polarisationszustand des in den Walzenspalt einfallenden Lichtes auszuführen.

3.3 Auswahl und Charakterisierung der eingesetzten Druckfarbe

3.3.1 Auswahl

Das von den Druckfarben remittierte Licht enthält nur einen bestimmten, dem jeweiligen koloristischen Charakter entsprechenden Spektralbereich des sichtbaren Lichtes. Da auch die Empfindlichkeit des bei den photoanalytischen Untersuchungen eingesetzten photographischen Filmmaterials von der Wellenlänge des Lichtes abhängt und darüber hinaus die Lichtremission eines Funkens in der verwendeten Blitzlampe eine spektrale Intensitätsverteilung besitzt, war es angebracht zu prüfen, mit welcher der drei bereits genannten Buntfarben die günstigsten Aufnahmebedingungen erreicht werden konnten. Hierzu wurde die Gummi- und die Glaswalze mit einem nicht zu großen Farbauftrag jeweils einer der drei Buntfarben beschickt. Dann wurden mehrere Aufnahmen von der Spaltzone erstellt. Als am günstigsten für die photoanalytischen Untersuchungen erwies sich dabei Cyan. Dieses kam deshalb auch für die Durchführung der Untersuchungen nahezu ausschließlich zum Einsatz. Auch mit Gelb hätten die Untersuchungen noch durchgeführt werden können, während Magenta hierfür als ausgesprochen ungünstig zu bezeichnen war.

3.3.2 Drucktechnische Charakterisierung

Bei der ausgewählten Cyan-Buntfarbe handelte es sich um eine vielseitig einsetzbare Bogenoffset-Farbe. Sie ist besonders zum Druck von Naturpapieren (Offsetpapieren), mattgestrichenen sowie gußgestrichenen Papieren geeignet. Sie wird oft benutzt, wenn es auf die Schmierfestigkeit der Druckfarbe ankommt, und kann auch auf hochtourigen Offsetmaschinen eingesetzt werden (Charakterisierung nach Angaben in /42/).

3.3.3 Mikroskopische Untersuchungen

Untersuchungen von auf transparenten Glasplättchen aufgetragener Druckfarbe unter einem Mikroskop ließen - abgesehen von gelegentlich vorgefundenen Agglomerationen - selbst bei einer Vergrößerung von 600:1 keine Strukturen in der Druckfarbenschicht erkennen. Diese erschien vielmehr stets gleichmäßig pigmentiert. Da die Färbung von Pigmentteilchen in der Druckfarbe hervorgerufen wird, muß man annehmen, daß die Dimensionen der Pigmentteilchen kleiner als die Wellenlänge des in der Druckfarbe nicht absorbierten Lichtes ist. Solche Abmessungen sind auch notwendig, um eine Depolarisierung des von der Druckfarbe remittierten Lichtes durch Vielfachstreuung bei Einstrahlung linear polarisierten Lichtes zu erreichen.

Der Farbeindruck der verwendeten Cyan-Druckfarbe wird durch die in ihr enthaltenen Phthalocyanin-Pigmente hervorgerufen. Letztere lassen sich heute mit einer mittleren Teilchengröße zwischen $0,01\mu\text{m}$ und $0,1\mu\text{m}$ herstellen.

Die mikroskopische Untersuchung und die erwähnte Depolarisierung des Lichtes legen daher nahe, daß die Teilchengröße der farbgebenden Pigmente in der Druckfarbe in dieser Größenordnung liegt.

Es sei deshalb hier darauf hingewiesen, daß diese Pigmente im Rahmen der photoanalytischen Untersuchungen nicht als Einzelteilchen aufgelöst werden können.

3.4 Durchführung und Ergebnisse der photoanalytischen Untersuchungen

Die in den voranstehenden Abschnitten 3.1 und 3.2 dargelegten optischen Eigenschaften der den Walzenspalt bildenden oder diesen füllenden Substanzen bilden die Grundlage für die Interpretation der gewonnenen photographischen Bilder. Diese Interpretation und die dabei erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse über das Verhalten von Druckfarbe in einem Walzenspalt sollen Gegenstand dieses Abschnittes sein.

Die Untersuchungen erfolgten mit der gleichen Gummiwalze, deren Oberflächenstruktur bereits in Abb. 13 und 14 gezeigt wurde. Die dargelegten Ergebnisse sind daher für diese Walze gültig.

Die Beistellung der Gummiwalze an die Glaswalze betrug stets etwa 0,5 mm. Farbbeschickung und Walzengeschwindigkeit wurden dagegen variiert.

3.4.1 Analyse bei kleinsten Schichtdicken

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß bei einer Anstellung der viskoelastischen Gummiwalze an die vergleichsweise starre Glaswalze sich die auf der Gummiwalze vorhandene Oberflächen-Rauigkeit nicht voll einebnet, die Gummiwalze also nicht glatt an der Glaswalze anliegt.

Beschickt man nun das Zweiwalzensystem mit einem geringen Farbangebot, das noch unter den in Farbwerken vorkommenden Schichtdicken liegt, so lassen sich Bilder von der Spaltzone ähnlich dem in Abb. 17 gewinnen. Auf diesem Bild war die Schichtdicke etwa 1,2 μm auf jeder Walze. Es ist sehr aufschlußreich und sei daher ausführlich besprochen.

Dieses Bild wurde bei Stillstand der Walzen aufgenommen und zeigt die Sicht auf den gleichen Oberflächenbereich der Gummiwalze wie in Abb. 13, 14 und 15.

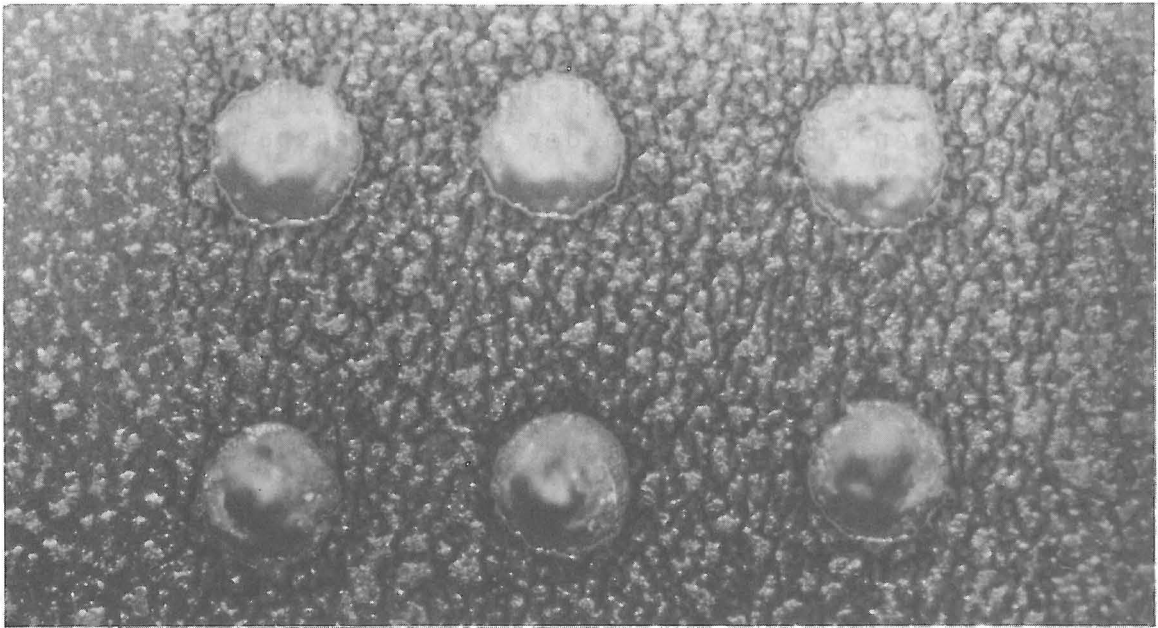


Abb. 17 Einblick in den Walzenspalt bei stehenden Walzen
nach Beschickung mit sehr wenig Farbe

M = 20:1

Deutlich läßt sich links und rechts von den in die Gummi-
oberfläche gebohrten Löchern jeweils der Rand der von der
Gummi- und der Glaswalze gebildeten Spaltzone erkennen.
Außerhalb dieser Spaltzone zeigen sich als dunkle Flächen-
bereiche die farbbedeckten, als hellere Flächenbereiche die
farbfreien Gebiete der Gummiwalzenoberfläche. Zusätzlich
treten helle Reflexionen auf, die durch Spiegelung des
Lichtes an jenen Stellen der Farboberfläche hervorgerufen
werden, die zufällig so gegen die makroskopische Oberfläche
geneigt sind, daß für sie der optische Strahlengang das Re-
flexionsgesetz erfüllt. Die Zuordnung der hellen und dunklen
Flächenbereiche in Abb. 17 zu farbfreien und farbbedeckten
Oberflächenbereichen auf der Gummioberfläche entspricht
voll den Ausführungen im Abschnitt 3.2. Diese lassen nämlich
erwarten, daß die farbfreien Bereiche auf der Oberfläche der
Gummiwalze aufgrund der regulären Reflexionen an Elementar-

spiegelflächen der Oberfläche heller, die farbbedeckten Oberflächenbereiche wegen der Unterdrückung dieser Reflexionen dunkler erscheinen; von letzteren wird nur das durch Streuung in der Druckfarbenschicht remittierte Licht vom Aufnahmeobjektiv aufgefangen.

Noch differenzierter erscheint das Bild innerhalb der Spaltzone. Zusätzlich zu den bereits außerhalb der Spaltzone vorgefundenen Bereichen farbfreier und farbbedeckter Gebiete der Gummiwalzenoberfläche und der Reflexionsstellen an der Grenzfläche zwischen Druckfarbe und Luft tritt nun innerhalb der Spaltzone eine weitere Strukturierung auf, die dunkler als die farbbedeckten Bereiche und von diesen stets umgeben ist. Diese Strukturierung läßt sich den Spitzen der Oberflächen-Rauhigkeit auf der Gummiwalze zuordnen. Da sie dunkel erscheinen und sich in ihrer Nähe stets Druckfarbe befindet, ist anzunehmen, daß sie von dieser oder vielleicht auch von Bestandteilen des Bindemittels der Druckfarbe benetzt sind. Mit Sicherheit kann man nämlich davon ausgehen, daß die Flächenbelegung der Farbpigmente in der Druckfarbe über den betreffenden Oberflächenbereichen wesentlich geringer als in den dazu benachbarten farbhaltigen Bereichen ist. Hieraus läßt sich leicht der Schluß ziehen, daß die Dicke der benetzenden Schicht zwischen den Rauhigkeitsspitzen der Gummiwalzenoberfläche und der Glaswalze wesentlich kleiner als die der Druckfarbe in der Nähe der Rauhigkeitsspitzen ist. Denn wäre dem nicht so, so wäre aufgrund der gleichmäßigen Pigmentverteilung in der Druckfarbe für Schichtdicken, die größer als der (mittlere) Korndurchmesser der Farbpigmentteilchen sind, im Bild kein Schwärzungsunterschied zwischen den nun tatsächlich zu erkennenden Strukturen feststellbar.

In Anbetracht der mittleren Teilchengröße der Pigmente in der Druckfarbe von weniger als $0,1 \mu\text{m}$ sowie in Anbetracht der geringen mittleren Schichtdicke der Druckfarbe auf den Walzen kann man deshalb davon ausgehen, daß in Abb. 17 die Rauhig-

keitsspitzen der Gummiwalze sich so nahe an der Glaswalze befinden, daß man bei Absehen von einer äußerst dünnen benetzenden Zwischenschicht von Berührung sprechen kann.

Unmittelbar um diese Kontaktstellen liegt ein mit Farbe ausgefüllter Bereich, der in größerer Entfernung von den Kontaktstellen von farbfreien Bereichen durchsetzt ist. Letztere scheinen sich hauptsächlich an Stellen der Rauigkeitstäler auf der Gummiwalze zu befinden.

Diese aus Abb. 17 gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch entsprechenden Bildern entnehmen, die bei etwa gleichem Farbauftrag bei langsam rotierenden Walzen gewonnen wurden. Ein Beispiel hierfür gibt Abb. 18. Hier drehen sich die Walzenoberflächen von links nach rechts. Die Farbschicht auf den Walzen ist hier noch etwas kleiner als im Falle der Abb. 17. Aus

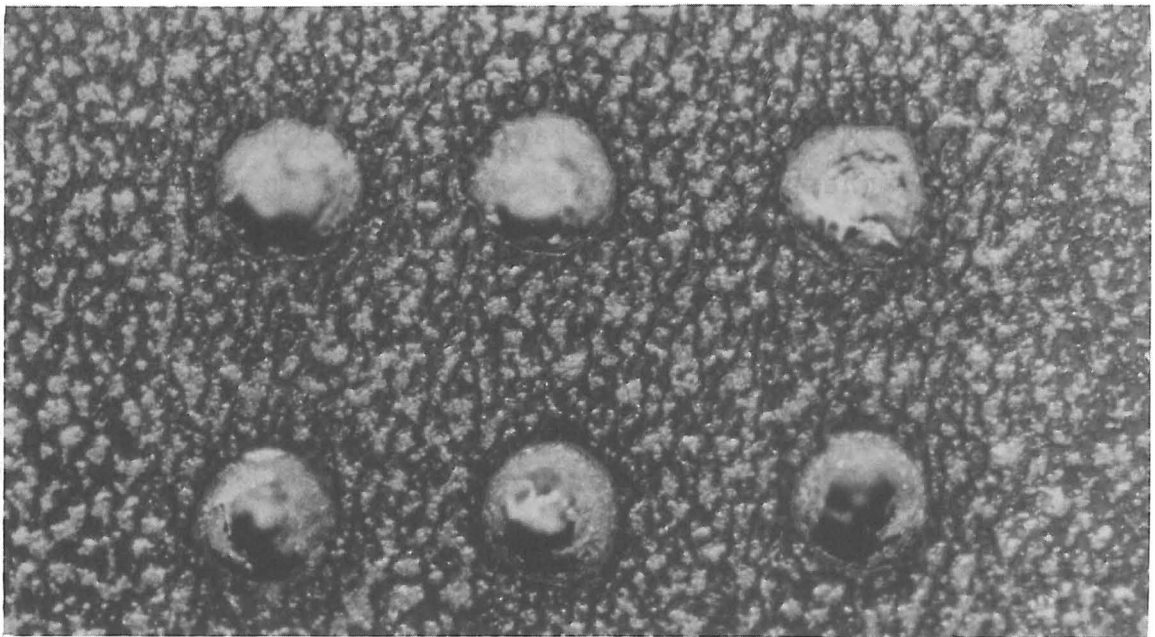


Abb. 18 Einblick in den Walzenspalt nach Beschickung mit sehr wenig Farbe bei einer Walzengeschwindigkeit von 0,8 m/sec. Die Walzenoberflächen bewegen sich von links nach rechts

M = 20:1

diesem Grunde kann man wohl die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze bereits vor dem Erreichen der Spaltzone wahrnehmen. Über diesen Rauigkeitsspitzen befindet sich jedenfalls nicht viel Druckfarbe. Diese haftet vielmehr hauptsächlich an den zu den Rauigkeitsspitzen ansteigenden Schräghängen auf der Gummioberfläche.

In der Spaltzone durchdringen die Rauigkeitsspitzen dann die geringe über ihnen und an entsprechender Stelle auf der Glaswalze befindliche Farbe weitgehend, wobei diese leicht in die vorhandenen luftgefüllten Hohlräume der Rauigkeitsvertiefungen ausweichen kann. Dagegen sind in Abb. 18 auf der Auslaufseite die Rauigkeitsspitzen der Gummioberfläche nicht wahrzunehmen. In dieser Zone wird die Druckfarbe zwischen den beiden Walzen in einer Vorstufe zum eigentlichen Farbspaltungsprozess am Ende der Auslaufzone bereits zu Wänden und Fäden ausgezogen. Diese Strukturen bilden sich - wie Abb. 18 zeigt - also jeweils gerade dort, wo sich die Rauigkeitsspitzen auf der Gummiwalze befinden.

Bei den bisher zur Rede stehenden, geringen Farbbeschickungen der Walzen kann man von einem Fließen der Farbe durch den Walzenspalt in keiner Weise reden. Wenn überhaupt ein Fließen stattfindet, so ist es lokal eng begrenzt auf die Stellen, an denen die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze die vor Eintritt in den Spalt auf der Glaswalze haftende Farbschicht beiseite drücken.

Wie sieht nun die Situation im Walzenspalt aus, wenn das Zweiwalzensystem mit einem größeren Farbangebot beschickt wird? Hierzu wurden Untersuchungen von 2 μm , 4 μm , 8 μm und 16 μm ausgeführt.

3.4.2 Analyse bei kleinen Schichtdicken

Die beiden Bilder in Abb. 19 geben einen Einblick in den Spalt, wieder mit Sicht auf den gleichen Oberflächenbereich

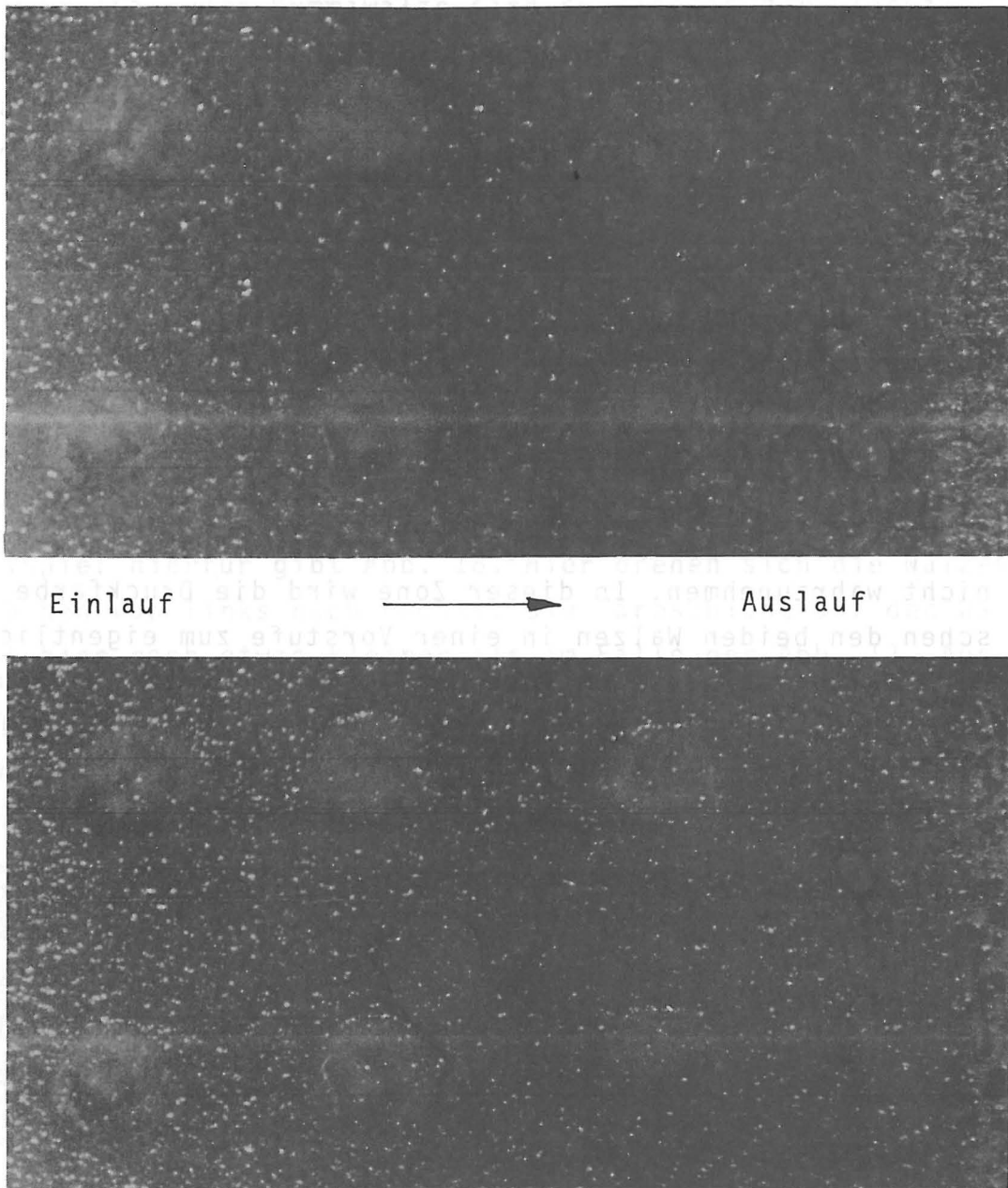


Abb. 19 Einblick in den Walzenspalt nach Beschickung mit Farbe in einer Schichtdicke von etwa $2\text{ }\mu\text{m}$ pro Walze.
oben: Walzengeschwindigkeit $0,11\text{ m/sec}$
unten: Walzengeschwindigkeit $0,50\text{ m/sec}$
Die Walzenoberflächen bewegen sich von links nach rechts.

M = 20:1

der Gummiwalze wie zuvor, bei zwei verschiedenen Walzengeschwindigkeiten im Falle einer Schichtdicke von etwa 2 μm auf jeder Walze. Diese Schichtdicke entspricht der, mit der GLÜCK seine Messungen über das mechanische Rollverhalten eines aneinander gestellten visko-elastischen Walzenpaares ausführte /19/.

In beiden Bildern sind die Lagen der in die Gummiwalze gebohrten Löcher noch deutlich zu erkennen. Auch die Rauigkeitsspitzen der Gummioberfläche können auf beiden Bildern noch wahrgenommen werden. Allerdings sind die entsprechenden Bildstrukturen nur sehr kontrastarm und somit nicht sehr deutlich ausgeprägt. Daß es sich hierbei tatsächlich um die Strukturen handelt, die auf die Rauigkeit der Gummiwalze zurückzuführen sind, konnte durch Vergleich dieser Strukturen mit den in Abb. 17 und 18 vorzufindenden bestätigt werden. Soweit solche Strukturen in den Bildern der Abb. 19 erscheinen, stimmen sie in Form und gegenseitigem Abstand mit denen in Abb. 17 und 18 überein.

Darüber hinaus zeigen die beiden Bilder zahlreiche Stellen direkter Strahlungsreflexion, die besonders auf der Einlaufseite auftreten und - wie ein Vergleich zwischen den beiden Bildern offenbart - bei der höheren Geschwindigkeit häufiger vorhanden sind als bei der niedrigeren. Die mit den Lichtreflexionen in Zusammenhang stehenden Informationen werden weiter unten noch näher erörtert werden.

Hier soll zunächst der Frage nachgegangen werden, ob auch bei einer der Praxis entsprechenden Farbbeschickung der Walzen Kontaktstellen zwischen der Gummiwalze und der Glaswalze existieren.

In Anbetracht der Kontrastarmut, mit der die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze in den Bildern der Abb. 19 hervortreten, sollte man nämlich aus diesen Bildern nicht voreilig den Schluß ziehen, daß die Rauigkeitsspitzen wie im Falle der Abbildungen 17 und 18 die Glaswalze berührten oder von

dieser nur durch eine äußerst dünne Benetzungsschicht getrennt seien. Da die eingesetzte Druckfarbe wie nahezu alle praxisüblichen Buntfarben in dünner Schicht eine gewisse Transparenz besitzt, können sie Rauigkeitsspitzen trotz Streuung des einfallenden Lichtes in der Druckfarbe noch durch eine dünne Druckfarbenschicht erkannt werden.

Die Lichtstreuung in der Druckfarbe über den Rauigkeitsspitzen führt hierbei zu der festgestellten Kontrastschwäche der entsprechenden Strukturen. Tatsächlich treten die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze deutlicher hervor, wenn man die Walzen anhält, wie dies im Bild der Abb. 20 zu entnehmen ist.

Dieses Bild wurde mit unverändertem Farbauftrag auf den Walzen bei Walzenstillstand etwa sechs Minuten nach Anhalten der Walzen aufgenommen. In der Zeit des Walzenstillstandes scheinen also die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze die Farbschicht beiseite zu drücken und näher an die Glasoberfläche heranzukommen, als dies bei rotierenden Walzen der Fall ist.

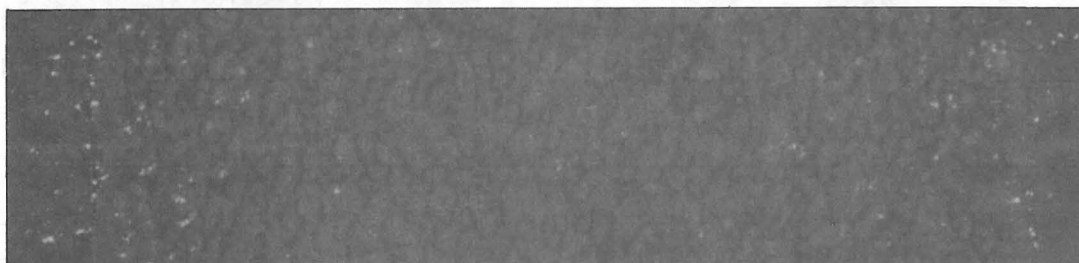


Abb. 20 Einblick in den Walzenspalt bei gleichem Farbauftrag wie im Falle der Abb. 19, etwa 6 Minuten nach Walzenstillstand

M = 20:1

Die in Abb. 19 und 20 gezeigten Bilder lassen also schon für eine Farbschichtdicke von $2\text{ }\mu\text{m}$ auf jeder Walze erkennen, daß ein Kontakt der Rauigkeitsspitzen der Gummioberfläche mit der Glaswalze bei Rotation der beiden Walzen von der sich in deren Spalt befindlichen Farbe verhindert wird.

3.4.3 Analyse bei stillstehenden Walzen

Die gleichen Gegebenheiten sollte man auch bei Beschickung der Walzen mit einer größeren Farbschichtdicke erwarten, was auch tatsächlich festgestellt werden konnte. So lassen die Bilder, die bei einer Farbschichtdicke von 4 μm auf jeder Walze gewonnen wurden, die Rauigkeitsspitzen der Gummioberfläche bei laufenden Walzen kaum erkennen. Erst nach dem Anhalten der Walzen treten die Rauigkeitsspitzen auf den dann aufgenommenen Bildern mit zunächst geringem, nach Standzeiten von Minuten auch mit stärkerem Kontrast wieder in Erscheinung.

Bei noch wesentlich stärkerer Farbbelegung auf den Walzen sind die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze auch nach einem Walzenstop für längere Zeit nicht zu sehen; die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze treten dann vielmehr erst im Verlaufe von Minuten nach dem Anhalten der Walzen langsam aus der Druckfarbschicht hervor. Dies wird in Abb. 21 mit einer Reihe von Bildern gezeigt, die in einer Zeit von 15 Minuten nach dem Anhalten der Walzen gewonnen wurde. Die Walzen waren hierbei jeweils mit einer Farbschicht von 8 μm beschickt.

Entsprechende Untersuchungen wurden bis zu Farbschichtdicken von 16 μm auf jeder Walze ausgeführt. Dabei zeigte sich, daß die Zeit bis zu der die Rauigkeitsspitzen nach dem Anhalten der Walzen auf den Bildern erscheinen oder bis zu der die betreffenden Strukturen auf den Bildern einen bestimmten Kontrast gegenüber der Druckfarbe erhalten mit zunehmender Schichtdicke der Druckfarbe auf den Walzen ebenfalls zunimmt. Darüber hinaus fiel insbesondere im Falle stärkerer Farbbelegung auf, daß - wie dies auch die Bilder in Abb. 21 zeigen - die Rauigkeitsspitzen stets zunächst am Rand der Spaltzone und erst später auch in deren Mitte erscheinen.

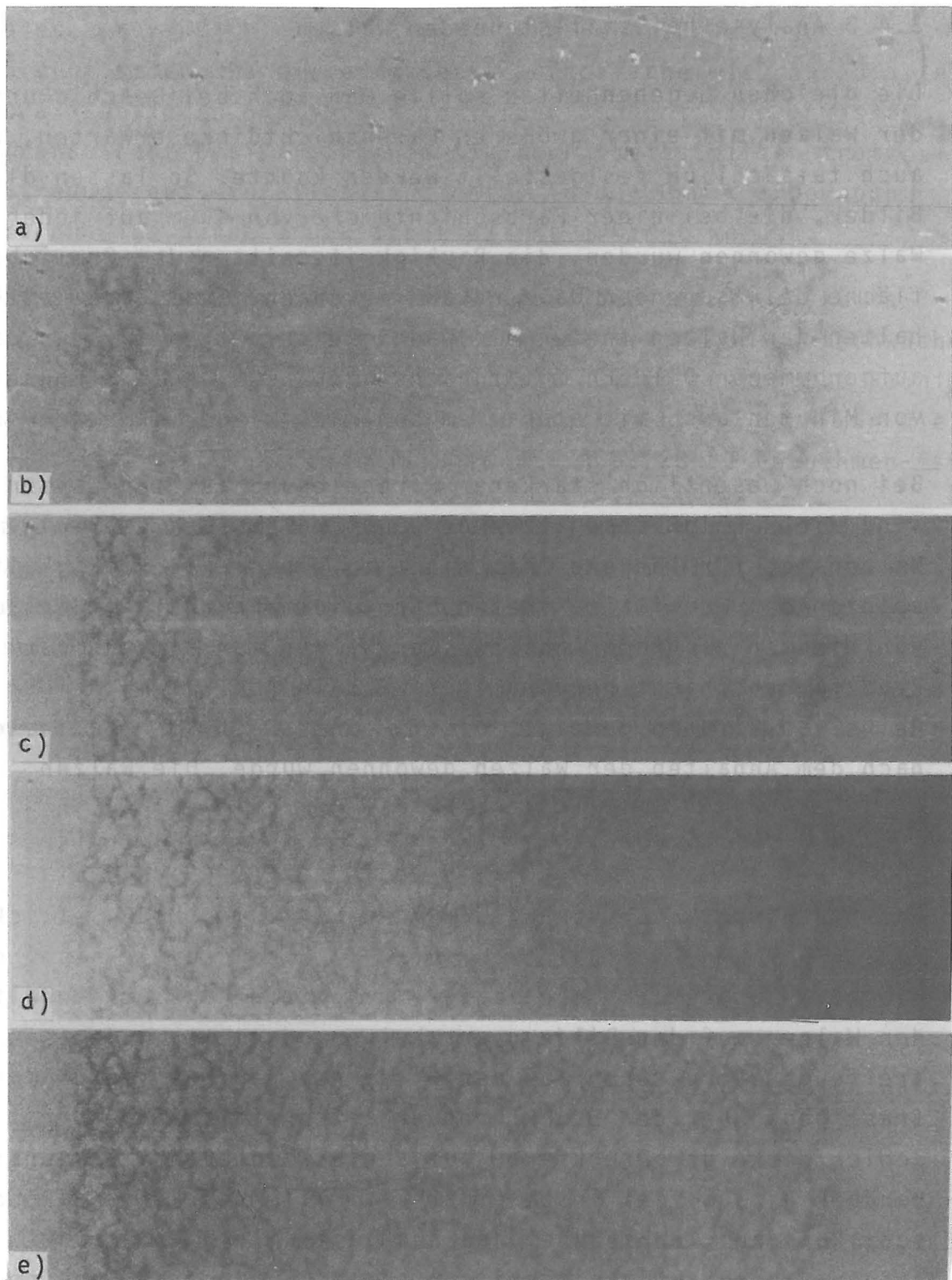


Abb. 21 Einblick in den Walzenspalt bei Farbauftrag von etwa
8 μm pro Walze
a) 15 Sekunden, b) 2 Minuten, c) 5 Minuten
d) 8 Minuten, e) 15 Minuten nach Anhalten d. Walze
M = 20:1

3.4.4 Schlußfolgerungen über das Auftreten hydraulischen Fließens

Aufgrund des Bildmaterials von Aufnahmen nach Anhalten der beiden Walzen kann der Frage nachgegangen werden, ob die Druckfarbe im Walzenspalt einem hydraulischen Fließen unterliegt. Da beide Walzen zueinander beigestellt sind, ist im Walzenspalt eine Druckkraftverteilung vorhanden. Diese kann wegen des Stillstandes der Walzen als quasistatisch angenommen werden. Die Rauigkeitsspitzen der Gummioberfläche können bei nicht zu geringer Farbbeschickung jedoch erst mehrere Minuten nach Stillstand der Walzen wahrgenommen werden. Während dieser langen Zeit kriecht ein Teil der Farbe aus dem Walzenspalt heraus. Der damit verbundene sehr langsame Farbfluß wird wohl durch den aus der Druckkraftverteilung resultierenden Druckkraftgradienten im Walzenspalt hervorgerufen.

Hierfür spricht insbesondere die Feststellung, daß auf den nach Anhalten der Walzen photographierten Bildern die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze im Verlauf der Zeit zuerst am Rand der Spaltzone und später erst auch in deren Mitte erkannt werden können.

Wegen der gegenüber den Spaltabmessungen großen Länge der Walzen kann ein Fließen im Walzenspalt als ebenes Problem betrachtet werden. In Anbetracht der Kleinheit der Spalthöhe können Druckunterschiede in Richtung der Spalthöhe als klein angesehen und vernachlässigt werden. Die Druckverteilung im Walzenspalt braucht also nur längs des Spaltes betrachtet zu werden. Für sie kann man für eine Näherungsbetrachtung die für die Anstellung zweier Walzen aus der Hertzschen Theorie /46/ folgende Druckverteilung übernehmen, wobei die Glaswalze als ideal starr zu betrachten ist.

Diese Druckverteilung beträgt, wenn die Koordinate längs des Spaltes mit z bezeichnet wird,

$$p(z) = p_0 \sqrt{1 - \frac{z^2}{a^2}} \quad (12)$$

Hierin sind p_0 der Druck an der Stelle der Spaltmitte $z=0$ und $2a$ die Spaltlänge.

Die Druckverteilung nach Gl (12) ist zusammen mit ihrem Gradienten $\frac{dp}{dz}$ in Abb. 22 wiedergegeben.

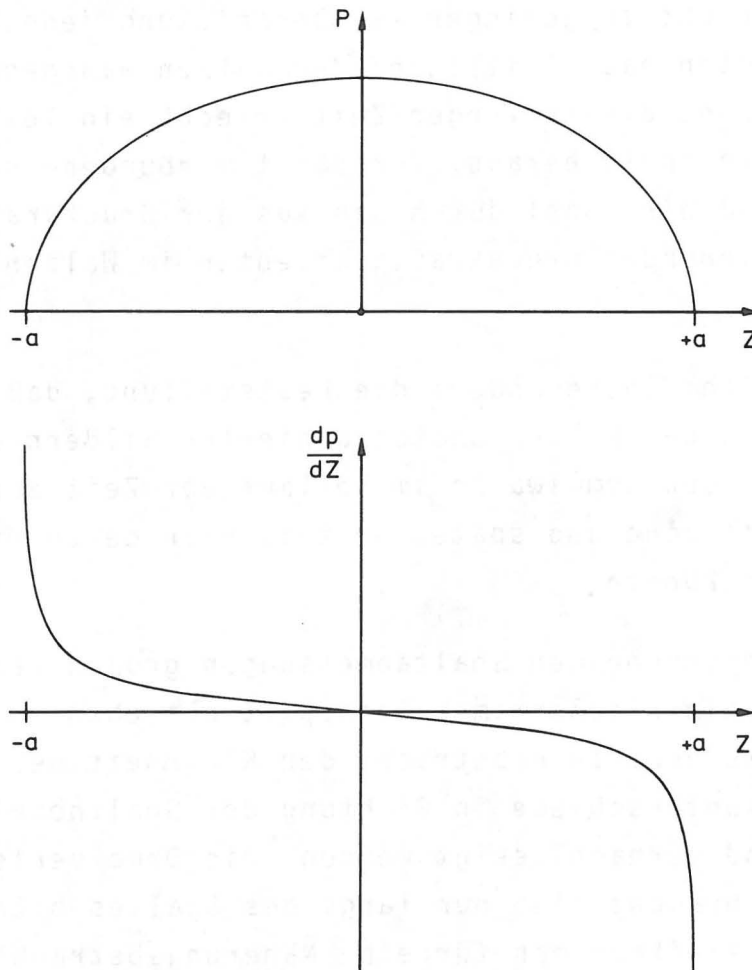


Abb. 22 Hertzsche Druckverteilung und ihr Gradient

Der sich hierbei in unmittelbarer Umgebung von $z=a$ und $z=-a$ ergebende Verlauf der Druckkraft und die entsprechenden Werte für den Druckgradienten sind physikalisch als irreald anzusehen und dem Näherungscharakter von Gl. (12) zuzuschreiben. Doch

kann man aus Abb. 22 die qualitative Aussage entnehmen, daß am Rand des Walzenspaltes der Druckgradient recht große Betragswerte annimmt. Im Innern des Walzenspaltes besitzt der Druckgradient dagegen kleinere Betragswerte. Entsprechend sollte man am Rand des Walzenspaltes eine größere Fließgeschwindigkeit und im Innern des Walzenspaltes eine kleinere Fließgeschwindigkeit erwarten. Die größere Fließgeschwindigkeit am Rand des Walzenspaltes führt aber zu einer schnelleren Entleerung der betreffenden Spaltzone und damit einer schnelleren Erniedrigung der Spalthöhe als bei einer weiter innen liegenden Spaltzone, wo die Fließgeschwindigkeit kleiner ist und die Spalthöhe sich somit langsamer erniedrigt. Dies ist aber genau der Sachverhalt, den man den zeitlich aufeinander folgenden Aufnahmen nach Anhalten der beiden Walzen entnehmen kann.

Die Abhängigkeit der Spalthöhe H vom Ort z und der Zeit t unterliegt hierbei der Integralbeziehung

$$H_0 z - \int_0^z H(z', t) dz' = \int_0^t \bar{u}(z, t') \cdot H(z, t') dt' \quad (13)^*)$$

Hierin stellt H_0 die für alle z als gleich angenommene Spalthöhe nach Abbremsung der Walzen zur Zeit $t=0$ und \bar{u} die an jeder Stelle z über der Höhe H zu mittelnde, mittlere Geschwindigkeit der Farbelemente zum Rand des Spaltes dar. Die Beziehung (13) ergibt sich aus Gründen der Masseerhaltung. In ihr wird auf der linken Seite die Differenz aus den zwischen $z=0$ und einer anderen Stelle z vorhandenen Farbvolumen bei Anhalten der Walzen zur Zeit $t=0$ und dem zur Zeit t vorhan-

*) Für Funktion und zugehörige Funktionswerte wird der Übersichtlichkeit wegen stets das gleiche Symbol benutzt. Der Charakter geht jeweils aus dem Zusammenhang hervor. - Die Integrationsvariablen werden zur Unterscheidung von den jeweils als obere Grenze dienenden Variablen mit einem Strich versehen.

denen Volumen gebildet, jeweils bezogen auf die Walzenlänge 1. Das Integral rechts dagegen stellt das in der seit Anhalten der Walzen verstrichenen Zeit t an der Stelle z durchgeflossene Farbvolumen dar (ebenfalls dividiert durch 1).

Für hinreichend große Zeiten t wird H für alle z sehr klein sein und das Integral über z auf der linken Seite von Gl. (13) nähert sich dem Wert Null. Dann gilt näherungsweise

$$H_0 z = \int_0^t \bar{u}(z, t') \cdot H(z, t') dt' \quad (14)$$

Das hierin noch enthaltene Integral kann mit Hilfe des Mittelsatzes ausgewertet werden. Aus Gl. (14) ergibt sich dann

$$H_0 z = \bar{u}_m(z) \cdot H_m(z) \cdot t \quad (15)$$

Hierin sind \bar{u}_m und H_m jeweils ein bestimmter Wert der mittleren Geschwindigkeit \bar{u} und der Spalthöhe H , die innerhalb des durch die Integrationsgrenzen in Gl. (14) angegebenen Zeitintervalls irgendwann zum gleichen Zeitpunkt angenommen werden.

Es handelt sich hierbei also um bezüglich des betreffenden Zeitintervalls effektive Werte, die allerdings noch vom Ort z abhängen.

Gl. (15) gestattet nun bei Kenntnis der Dauer des Farbflusses zur Entleerung des statischen Walzenspaltes die hierfür effektive, mittlere Geschwindigkeit zu bestimmen. Denn aus Gl. (15) folgt

$$\bar{u}_m(z) = \frac{H_0 \cdot z}{H_m(z) \cdot t} \quad (16)$$

Die Dauer des Farbflusses kann der Bildfolge z. B. in Abb. 21 entnommen werden. Sie entspricht in etwa der Zeit, die nötig ist, um die Rauigkeitsspitzen der Gummiwalze mit einem ge-

wissen Kontrast auf den Bildern erkennen zu können. Denn dann ist an den betreffenden Stellen die Spalthöhe so klein geworden, daß der Ersatz von Gl. (13) durch die dann näherungsweise gültige Beziehung (14) berechtigt ist. Für die Abschätzung der mittleren Geschwindigkeit \bar{u}_m wird von den durch Abb. 21 dargelegten Verhältnissen ausgegangen. Danach ergibt sich in der Nähe der Spaltmitte (etwa 1 mm von der Spaltmitte entfernt) für die hier angesprochene Zeit etwa 1000 s (16 Minuten), am Rand der Spaltzone (etwa 3 mm von der Spaltmitte entfernt) jedoch nur etwa 300 s (5 Minuten).

Nimmt man für das Verhältnis H_0/H_m jeweils den Quotienten $1/2$ an, so ergibt sich aus Gl. (16) für die effektive mittlere Geschwindigkeit in der Nähe der Spaltmitte $\bar{u}_m = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ und am Rand der Spaltzone $\bar{u}_m = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.

Dies sind recht kleine Werte. Obwohl sie an stillstehenden Walzen ermittelt wurden, kann man annehmen, daß sie größenordnungsmäßig in etwa auch bei rotierenden Walzen zutreffen. Denn ein hydraulisches Fließen der Farbe im Walzenspalt wird auch dann hauptsächlich aus der Druckkraftverteilung im Spalt resultieren. Wenn die Walzenbeistellung nicht geändert wird, ist die Druckkraft im dynamischen Fall in gleicher Größenordnung (maximal doppelt so groß) und die Druckkraftverteilung längs des Spaltes unterscheidet sich nur durch die Verschiebung des Maximums von der im statischen Fall. Dann aber sollte auch die Größenordnung der mittleren Geschwindigkeit für hydraulisches Fließen in beiden Fällen nicht wesentlich voneinander verschieden sein. Die Walzengeschwindigkeit hat somit nur einen geringen Einfluß auf diese Größen.

Die Kleinheit dieser Geschwindigkeit läßt es interessant erscheinen, darzulegen, welche Wegstreckendifferenzen innerhalb der Farbschicht aufgrund eines hydraulischen Fließens im Walzenspalt während der Durchlaufzeit durch den Walzenspalt bei Rotation der Walzen erreicht werden. Diese Durchlaufzeit beträgt je nach Walzengeschwindigkeit etwa 10^{-3} bis 10^{-2} s.

Die innerhalb dieser Zeit mit Geschwindigkeiten in der Größenordnung von bis zu 10^{-5} m/s zurückgelegten Wegstreckendifferenzen betragen somit 10^{-8} m bis 10^{-7} m. Sie liegen in der Größenordnung linearer Dimensionen von Pigmenten in der Druckfarbe.

Charakteristisch klein ist auch das aufgrund solcher Fließgeschwindigkeiten sich ergebende Schergefälle. Dividiert man nämlich diese Geschwindigkeiten durch die Farbschichtdicke von etwa $5 \cdot 10^{-6}$ m, so erhält man für das entsprechende Schergefälle im Walzenspalt Werte in der Größenordnung 1 s^{-1} .

Ein hydraulisches Fließen der Farbe im Walzenspalt analog einer laminaren Strömung zwischen parallelen Platten ist also im Falle der hier untersuchten Druckfarbe bei den in Farbwerken vorkommenden Schichtdicken praktisch nicht gegeben. Die vielfach in der Literatur genannten Schergefälle in der Größenordnung zwischen 10^4 s^{-1} und 10^6 s^{-1} , denen die Druckfarbe in Spalten von Farbwerkswalzen ausgesetzt sein soll, können also nicht auf ein hydraulisches Fließen zwischen den Walzenoberflächen zurückgeführt werden, wie dies insbesondere die Arbeiten von MILL /3, 12/ sowie HELLINCKX und MEWIS /4, 5/ nahelegen.

Wenn darüber hinaus zwischen den Oberflächen der beiden Walzen in der Berührzone keine Geschwindigkeitsdifferenz auftritt, also Haften vorliegt, so kann man davon ausgehen, daß die Farbe praktisch nicht durch Scherkräfte beansprucht wird. Die meßtechnischen Untersuchungen über das Rollverhalten sollen darüber weiter Klarheit verschaffen.

3.4.5 Weitere Ergebnisse der Photoanalyse

Bei Betrachtung der Bilder in Abb. 19 wurde bereits erwähnt, daß diese zahlreiche Stellen direkter Strahlungsreflexion zeigen. Gleiches wurde nicht nur bei diesen Bildern gefunden, sondern im Prinzip bei allen Untersuchungen mit Farbschichtdicken von 2 μm und mehr pro Walze.

Die bei kleinen Schichtdicken ($2\text{ }\mu\text{m}$ und $4\text{ }\mu\text{m}$) gewonnenen Bilder sind diesbezüglich stets den in Abb. 19 gezeigten ähnlich. Ein weiteres Beispiel wird in Abb. 23 gegeben.

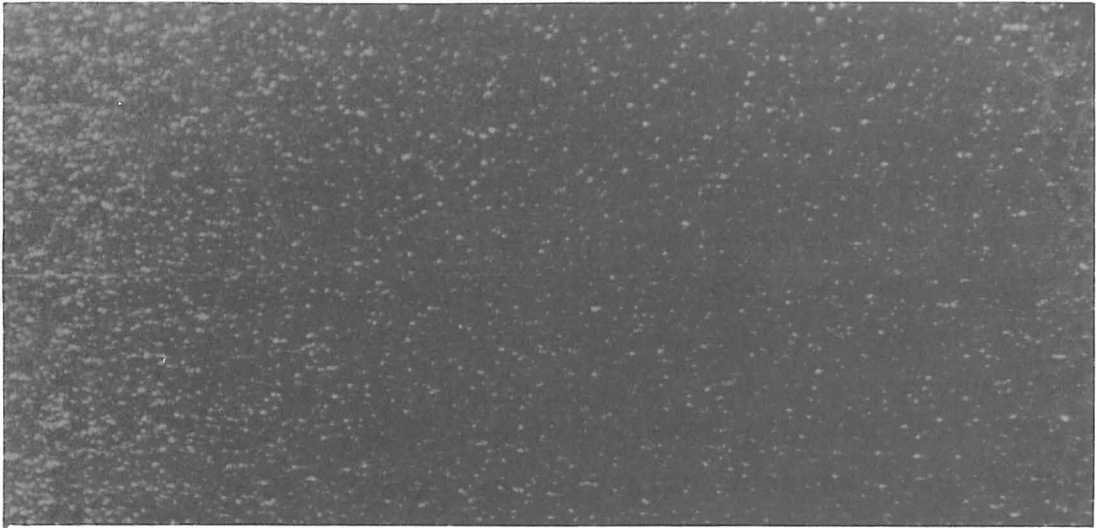


Abb. 23 Einblick in den Walzenspalt nach Farbauftrag von etwa $4\text{ }\mu\text{m}$ pro Walze und einer Walzengeschwindigkeit von $1,25\text{ m/sec}$. Die Walzenoberflächen bewegen sich von links nach rechts

M = 20:1

Bei diesen Schichtdicken erschienen die Reflexionsstellen stets nahezu punktförmig. In Anbetracht des Vergrößerungsmaßstabes der Bilder können ihre linearen Dimensionen im Walzenspalt zu $10\text{ }\mu\text{m}$ bis $50\text{ }\mu\text{m}$ angenommen werden. Nach den in Abschnitt 3.1 dargelegten Gesetzen der Optik weisen diese Reflexionsstellen auf Grenzflächen zwischen zwei Phasen mit wesentlich verschiedenen Brechungsindizes oder Absorptionsvermögen hin.

Bei kleineren Walzengeschwindigkeiten (nicht mehr als $0,5\text{ m/s}$) treten die Stellen direkter Reflexion, wie Abb. 19 zeigt, hauptsächlich auf der Einlaufseite und innerhalb der Spaltzone auf, weniger häufig dagegen auf der Auslaufseite. Man kann daher annehmen, daß die Farbschicht auf den Walzenoberflächen in der Einlaufzone vor Erreichen des Walzenspaltes keine glatten Oberflächen besitzt. Weiterhin kann man annehmen, daß

die Lichtreflexionen im Walzenspalt überwiegend durch Gaseinschlüsse (z. B. Luft) in der Druckfarbe sowie an Stellen mit ungenügender oder nicht vollständiger Benetzung des Bindemittels der Farbe auf einer der beiden Walzen hervorgerufen werden.

Die Reflexionsstellen in den Bildern der Abb. 19 geben somit einen Hinweis, daß sich im Walzenspalt - selbst bei relativ kleinen Walzengeschwindigkeiten von etwa 0,1 m/s und Beschickung der Walzen mit einer Farbschichtdicke von 2 μm pro Walze - keine homogene Farbschicht befindet. Die Anzahl der Reflexionsstellen und somit auch die durch sie angezeigten Inhomogenitäten in der im Walzenspalt befindlichen Farbschicht ist, wie die beiden Bilder in Abb. 19 darlegen, bei größerer Walzengeschwindigkeit ebenfalls größer.

Nach Aussage der Abb. 23 scheinen die Reflexionsstellen bei größerer Walzengeschwindigkeit (etwa 1,2 m/s) sogar nahezu gleichmäßig über die Spaltzone verteilt zu sein. Sie verschwinden jedoch weitgehend, wenn man die Walzen anhält. Zurück bleiben dann nur einige wenige Gaseinschlüsse, die langsam mit dem kriechenden Farbfluß zum Rand der Spaltzone wandern oder aber schon vor Erreichen des Randes kleiner werden und sich auflösen scheinen.

Bei Stop des Walzenlaufes aus sehr geringer Geschwindigkeit konnten die Bewegungsvorgänge im Walzenspalt, die zum Verschwinden der zahlreichen Reflexionsstellen in der Farbschicht führten, durch visuelle Beobachtungen gerade noch verfolgt werden. Man kann daher annehmen, daß die damit verbundenen Prozesse in einer Zeit der Größenordnung einiger Zehntel Sekunden ablaufen.

Diese Zeit ist jedoch immer noch groß gegenüber der Durchgangszeit, die ein Volumenelement der Druckfarbe benötigt, um durch den Spaltbereich zwischen zwei Walzen hindurch zu gelangen, selbst wenn die Walzengeschwindigkeit nur etwa 0,1 m/sec beträgt. Die Durchgangszeit ist also selbst für so kleine Wal-

zengeschwindigkeiten zu kurz, als daß Ausgleichsvorgänge in der Farbschicht im Walzenspalt wie nach einem Anhalten der Walzen vollständig ablaufen könnten. Bei größeren Walzengeschwindigkeiten werden diese Ausgleichsvorgänge während der Durchgangszeit praktisch gar nicht erst richtig anlaufen können.

Diese Folgerungen über den Zustand der untersuchten Druckfarbe in einem Walzenspalt wurde hier für den Fall gezogen, daß die Walzen des Zweiwalzenstuhles mit Farbe von etwa 2 μm oder 4 μm auf den Walzen beschickt waren. Eine gleichlautende Aussage ergibt sich jedoch auch bei Betrachtung der photographischen Bilder, die bei Belegung der Walzen mit einer Schichtdicke von 8 μm oder 16 μm gewonnen wurden.

Abb. 24 zeigt einen Einblick in den Walzenspalt bei einer Farbschicht von 16 μm pro Walze und zwei verschiedenen Geschwindigkeiten. Gegenüber den zuvor besprochenen Abbildungen treten weniger Reflexionsstellen auf; sie bilden zum Teil langgestreckte Reflexionsstreifen. Darüber hinaus enthält die Farbschicht eine gewisse Struktur, die in den Bildern bei der kleineren Walzengeschwindigkeit wolkenartig in Form von helleren und dunkleren Gebieten, bei der größeren Walzengeschwindigkeit dagegen nahezu streifenförmig erscheint. Sowohl die Reflexionsstreifen als auch die Strukturen verschwinden jedoch in Sekundenbruchteilen, wenn man die Walzen anhält. Im Walzenspalt befindet sich dann eine strukturlos erscheinende Farbschicht, die lediglich mit einer Anzahl von Gaseinschlüssen durchsetzt ist. Erst im Verlaufe von Minuten ändert sich das Bild durch das Verschwinden der Gaseinschlüsse und das langsame Hervortreten der Rauigkeitsspitzen auf der Oberfläche der Gummiwalze, wie dies bereits dargelegt wurde.

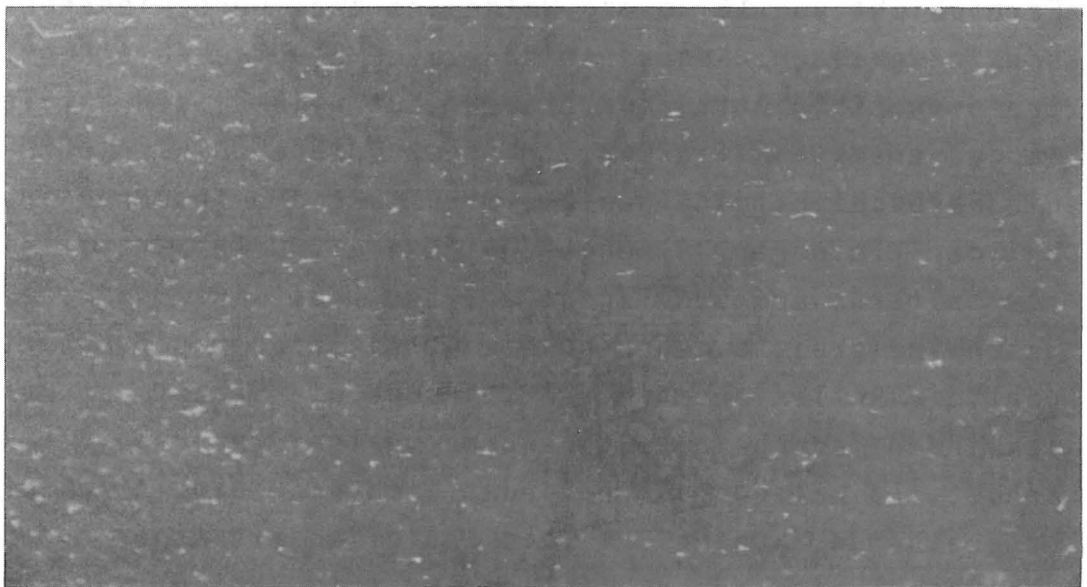


Abb. 24 Einblick in den Walzenspalt nach Farbauftrag von
etwa $16\text{ }\mu\text{m}$ auf jeder Walze
oben: Walzengeschwindigkeit $0,11\text{ m/sec}$
unten: Walzengeschwindigkeit $1,25\text{ m/sec}$
Die Walzenoberflächen bewegen sich von links
nach rechts
M=20:1

3.4.6 Zusammenfassung der photoanalytischen Ergebnisse

Die photoanalytischen Untersuchungen sollten näheren experimentellen Aufschluß über den Zustand einer Druckfarbe in Walzenspalten von Druckmaschinen und die sich in diesen Spalten abspielenden Vorgänge liefern.

Diese Untersuchungen erbrachten nun den Nachweis, daß der Farbtransport durch einen Walzenspalt nicht volumetrisch infolge der Berührung der Rauigkeitsspitzen auf der Oberfläche der Gummiwalze mit der Glaswalze erfolgt. Die beiden Walzenoberflächen wurden vielmehr bei Rotation der Walzen durch die zwischen ihnen liegende Farbschicht voneinander getrennt.

Darüber hinaus konnte insbesondere durch die Untersuchungen an stillstehenden Walzen gefolgert werden, daß die Druckfarbe im Walzenspalt trotz der in ihm herrschenden Druckverteilung praktisch keinem hydraulischen Fließen unterliegt. Ein Schergefälle, das seine Ursache in einem hydraulischen Fließen hätte, ist also nicht gegeben.

4. M E S S T E C H N I S C H E U N T E R S U C H U N G E N D E S R O L L V E R H A L T E N S

Im Anschluß an die photoanalytischen Untersuchungen wurde noch eine Reihe von Versuchen durchgeführt, die Aufschluß über die gegenseitige Beeinflussung der mechanischen Größen in einem Walzenfarbwerk geben sollten.

Aufbauend auf den Arbeiten von GLÜCK /19/ sollten damit weitere Informationen und Vorstellungen gewonnen werden über die im Spalt zwischen Gummi- und Stahlwalze stattfindenden Vorgänge, wenn sich eine Flüssigkeit in diesem Spalt befindet. Insbesondere von Interesse war es festzustellen, inwieweit hydrodynamische Theorien auf diese Vorgänge Anwendung finden können, um damit einer theoretischen Behandlung des Problemkreises "Farbe im Walzenspalt" auf die Spur zu kommen. Eng damit verbunden ist natürlich die Frage nach der in eine solche Theorie einzusetzenden Viskosität der Flüssigkeit zwischen den Walzen.

Druckfarbe ist eine pseudoplastische Flüssigkeit, deren scheinbare Viskosität - also das Verhältnis von Schubspannung τ zu Schergefälle D - mit wachsendem τ in den Rheogrammen abnimmt. Als Ersatz für diese sich von Punkt zu Punkt ändernde scheinbare Viskosität wird häufig die plastische Viskosität verwendet, deren Zahlenwert bei höheren Schubspannungen nahezu konstant ist.

Daß beide Werte in der Anwendung wenig zufriedenstellen, zeigt die Benutzung sog. Tackwerte, die an Walzenanordnungen - den Tackmetern - ermittelt wurden, um damit praxisgerechtere Bedingungen zu schaffen. Der Tack ist im Prinzip ein durch die Farbe bewirktes zusätzliches Drehmoment, das seine Ursache in dem Trennverhalten der Farbe im Auslauf des Walzenspaltes hat.

Die Untersuchung des Rollverhaltens mit Mitteln der elektro-

mechanischen Meßtechnik beinhaltet die Erfassung von auftretenden Kräften und Verformungen in Abhängigkeit der sie beeinflussenden Größen. Solche Größen sind:

- die Beistellung der Walzen zueinander
- die Drehzahlen bzw. Umfangsgeschwindigkeiten
- die Art der verwendeten Flüssigkeit (Materialkenngrößen)
- die Schichtdicken der Flüssigkeit
- die zu übertragenden Momente und damit die Schubspannungen im Spalt.

4.1 Der Schlupf und seine Bedeutung

Neben diesen weitgehend direkt zu messenden Größen ist der Schlupf eine daraus zu errechnende Größe von wesentlicher Aussagekraft.

Begrifflich könnte das Wort Schlupf nahelegen, daß es sich hier um das Gleiten von Oberflächen handelt. Dieser Gleitschlupf ist jedoch nur eine mögliche Variante des Schlupfes. Die zweite Variante - zur Unterscheidung als Dehnschlupf bezeichnet - hat ihre Ursache in der durch Krafteinwirkung verursachten Dehnung einer Oberfläche. Da Dehnungen von Festkörpern im allgemeinen klein sind, ist der Dehnschlupf vom Zahlenwert her auch kleiner als der Gleitschlupf oder anders gesagt: Bei großen Schlupfwerten liegt üblicherweise Gleiten vor.

Die folgenden Überlegungen zum Schlupf sollen dazu dienen, das Phänomen Schlupf ausführlich zu beschreiben und zu erklären, den Sinn der Schlupfuntersuchungen zu verdeutlichen und die Schlupfgleichungen herzuleiten. Damit können die interpretativen Aussagen zu den Schlupfmessungen besser verstanden werden.

Treibt eine über ihre Welle angetriebene Walze 1 eine zweite Walze durch Mitnahme infolge Reibung an, so errechnet sich

üblicherweise die Drehzahl der zweiten Walze aus der Gleichung $n_2 = n_1 \cdot r_1 / r_2$. Diese Beziehung - sie soll als "geometrisch" bezeichnet werden - ist hergeleitet unter der Bedingung gleicher Umfangsgeschwindigkeiten (nur Haften), kreisrunder Körper und unverformter Oberflächen. Gerade diese letzte Bedingung ist aber bei realen Materialien, die nicht ideal starr sind, nicht zu erfüllen, da diese sich beim Anpressen aufeinander sowohl radial als auch tangential verformen. Sind die beiden Walzen Stahlwalzen, so können bei nicht zu hohen Anpreßdrücken die Auswirkungen der Verformungen auf die Drehzahl vernachlässigt werden.

Ist jedoch die Walze 1 aus Stahl und Walze 2 aus Gummi, wobei der E-Modul von Gummi um einen Faktor zwischen 10^5 und 10^6 kleiner ist als der von Stahl, so können die Auswirkungen der Verformungen auf die Drehzahl der mitgenommenen Gummiwalze sicher nicht mehr außer Acht gelassen werden. Rein gedanklich kommt man zu folgenden Ergebnissen.

Die radiale Zustellung um die Strecke b führt bei fehlender tangentialer Verformung zu einer Verringerung des Abrollradius. Als Folge davon müßte die Walze 2 schneller drehen als dem geometrischen Verhältnis der unverformten Walzen entspricht.

Eine rein tangentialer Dehnung der Walzenoberfläche in der Druckzone führt zu einer Verlängerung $+\Delta U$ des abzurollenden Umfangs. Die Gummiwalze dreht langsamer als rein geometrisch.

Eine tangentialer Stauchung der Gummioberfläche hätte den gegenteiligen Effekt, die Gummiwalze würde schneller drehen.

Genau umgekehrt wie eben beschrieben werden die Drehzahlen der mitgenommenen Walze, wenn diese aus Stahl und die über ihre Welle angetriebene Walze aus Gummi ist.

Tritt in der gesamten Druckzone Gleiten auf, so dreht die mitgenommene Walze ebenfalls langsamer als dem geometrischen Verhältnis entspricht.

Die beschriebenen Abweichungen von der geometrisch errechenbaren Drehzahl werden als Schlupf bezeichnet, wobei man noch zur Unterscheidung der Schlupfursache von Verformungsschlupf - auch Dehnschlupf oder Formänderungsschlupf genannt - und Gleitschlupf spricht. Der Schlupf ist definitionsgemäß auf die Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit der antreibenden Walze bezogen.

$$s = \frac{r_1 \cdot \omega_1 - r_v \cdot \omega_v}{r_1 \cdot \omega_1} = \frac{\Delta v}{v} \quad (17)$$

Daraus folgt, daß der Schlupf positiv ist, wenn die antreibende Walze schneller als die durch Friktion mitgenommene Walze läuft, und er ist negativ im umgekehrten Fall.

Nun wird - wie man sich gut vorstellen kann - die tangentielle Verformung in der Druckzone ebensowenig über deren Breite konstant sein, wie es die radiale Verformung ist. Letztere ist durch die Eindringtiefe und die Kontur der Stahlwalze vorgegeben. Die tangentielle Verformung in der Druckzone, die bei fehlenden äußeren Tangentialkräften entsteht, ergibt sich nur durch die Querverschiebung des Materials infolge der Druckverteilung. Wegen der Berührung unter Druck mit der Stahlwalzenoberfläche wird diese Dehnung an der Oberfläche behindert. Dies gelingt solange, bis die tangentielle Randspannung eine größere Kraft erzeugt als das Produkt $P \cdot \mu$ ergibt. Dann erst kann sich die Gummiwalze innerhalb der Druckzone tangential verformen. Am Anfang und Ende der Druckzone ist die Normalkraft am kleinsten. Da der Reibkoeffizient μ einen endlichen Wert hat, muß die tangentielle Verschiebung vorwiegend an diesen beiden Stellen stattfinden. In der Mitte, wo die Druckverteilung ihr Maximum hat, wird Haften vorliegen, die bis dahin entstandene Verformung wird beibehalten und ist auch verantwortlich für die Drehzahl der getriebenen Walze.

Diese hier geschilderten Vorgänge erschweren Rechnung und Messung. Die jeweilige Größe der Reibzahl μ ist maßgebend

für das Auftreten von Gleit- und Haftgebieten. Sie bei den Messungen genau konstant zu halten, ist nur annäherungsweise möglich. Eine meßtechnische Untersuchung der Vorgänge im Mikrobereich ist wegen der schnellen Änderungen von Gleit- in Haftzonen wohl außerordentlich schwierig. Daher können nur die makroskopischen Auswirkungen in Form von Drehzahländerungen erfaßt werden. Die Form der tangentialen Verschiebungsverteilung in der Druckzone ist daher unbekannt. Eine Rechnung ist nicht möglich, da weder Spannung noch Verformung als bekannt vorgegeben werden können.

Sofern in der Druckzone die Haftung nicht so groß ist, daß sie jegliche tangential Verformung an der Oberfläche verhindert, muß notwendigerweise aus Gründen des Kräftegleichgewichts Gleiten in Teilbereichen auftreten.

Die bisherigen Überlegungen in Bezug auf den Schlupf und die Schlupfursachen sind allgemeiner Natur und sagen daher noch nichts über die tatsächlich auftretenden Gegebenheiten aus. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, daß bei der Kombination angetriebene Stahl- und durch Friktion mitgenommene Gummiwalze die letztere langsamer dreht als dem geometrischen Durchmesser Verhältnis entspricht. Der Schlupf ist im allgemeinen positiv, solange das Belagmaterial als weitgehend inkompressibel gelten kann. Da wegen des hohen Haftreibungskoeffizienten zwischen Gummi und Stahl Gleiten in dem maßgebenden Bereich der Druckzone ausgeschlossen werden kann, folgt daraus, daß die Oberfläche gedehnt werden muß.

Ist der Belag der Gummiwalze jedoch kompressibel, so treten negative Schlupfwerte auf. Die Walze mit dem kompressiblen Belag dreht schneller als nach der Übersetzungsgeometrie möglich. In diesem Falle muß eine Materialstauchung in der Druckzone existieren oder der Abrollradius ($r_v - b$) wirksam werden. Damit kommt eine neue Größe, nämlich die Querkontraktionszahl $\nu = \epsilon_q / \epsilon_1$ mit in die Überlegungen, wobei ϵ_q die Verformung quer zur Last Richtung und ϵ_1 diejenige in Last Richtung ist.

Ein inkompressibles Material ($\nu=0,5$) hat definitionsgemäß die größte Querdehnung. Bei einem idealen Material mit $\nu=0$ gibt es keine Querdehnung.

4.1.1 Die Schlupfgleichungen

Aus der Definitionsgleichung des Schlupfes kann man den für die Auswertung der Messungen wichtigen Zusammenhang zwischen Schlupf und gemessenem Drehzahlverhältnis herleiten. Durch den Schlupf wird die Abweichung vom reinen Rollen ausgedrückt:

$$s = \frac{\omega_{v0} - \omega_v}{\omega_{v0}} \quad (18)$$

Dabei ist ω_{v0} die Winkelgeschwindigkeit der Gummiwalze, die sich bei reinem Rollen mit $b=0$ ergäbe und ω_v die tatsächliche Winkelgeschwindigkeit bei der Anstellung $b>0$. ω_{v0} errechnet sich aus der Rollbedingung:

Geht man damit in die Gleichung (30) für den Schlupf, so erhält man die Beziehung zum gemessenen Drehzahlverhältnis

$$s = 1 - \frac{\omega_v \cdot r_v}{\omega_1 \cdot r_1} \quad (18a)$$

Das gemessene Drehzahlverhältnis a enthält die Anzahl q der vom Drehwinkelgeber pro Umdrehung abgegebenen Impulse

Damit erhält man die Auswertegleichung

$$s = 1 - \frac{q_1 \cdot r_v}{a \cdot q_v \cdot r_1} \quad (18b)$$

Die Auswertegleichung (18b) ist außerordentlich empfindlich auf geringfügige Änderungen im Radienverhältnis. Da gerade der Radius der Gummiwalze nur innerhalb eines gewissen Toleranzbereichs feststellbar ist, überträgt sich diese Toleranz in stärkerem Maß auch auf den errechneten Schlupf.

Die Beziehungen zwischen dem Schlupf und der für die Drehzahl der Gummiwalze maßgebenden Dehnung ergibt sich aus der folgenden Herleitung.

Es gelte die Annahme, daß beide Walzen in einem Zweiwalzen-System ohne tangentielle Vorverformung in die Druckzone eintreten. Zu Beginn der Druckzone wird das Bogenelement der Gummiwalze l_v um dl_v und ein Bogenelement der Stahlwalze l_1 um dl_1 gedehnt.

Außerhalb der Druckzone gilt für die Stahlwalze $r_1 \cdot \omega_1 = l_1/t$. In der Druckzone muß das verformte Element $l_1 + dl_1$ bzw. $l_v + dl_v$ in gleicher Zeit - wegen der stationären Drehung der Walzen - wie das einlaufende Umfangsstück seinen Weg zurücklegen.

$$v_1 = \frac{l_1 + dl_1}{t} = \frac{l_1 (1 + \epsilon_{t1})}{t} = r_1 \omega_1 (1 + \epsilon_{t1}) \quad (19)$$

Das gleiche gilt für die Gummiwalze.

$$v_v = \frac{l_v + dl_v}{t} = \frac{l_v}{t} (1 + \epsilon_{tv}) = r_v \cdot \omega_v (1 + \epsilon_{tv}) \quad (19a)$$

Im Haftfall müssen beide Umfangsgeschwindigkeiten in der Druckzone gleich sein. Setzt man $r_1 \cdot \omega_1 = r_v \cdot \omega_v$ so ergibt sich:

$$\frac{\omega_v}{\omega_1} = \frac{1 + \epsilon_{tv}}{1 + \epsilon_{t1}} \quad (19b)$$

Da die Dehnung der Gummiwalze ϵ_{tv} weitaus größer als die der Stahlwalze ϵ_{t1} ist, läßt sich an Gleichung (19b) gut erkennen, daß infolge der Dehnung die tatsächliche Winkelgeschwindigkeit ω_v kleiner ω_{v0} wird. Diese Aussage entspricht der Erfahrung und den Messungen.

Die gesuchte Beziehung zwischen Dehnung und Schlupf findet man durch Einsetzen von (19b) in (18a). Es wird im Haftfall

$$s = \frac{\epsilon_{tv} + \epsilon_{t1}}{1 + \epsilon_{tv}} \approx \frac{\epsilon_{tv}}{1 + \epsilon_{tv}} \approx \epsilon_{tv} \quad (20)$$

Im allgemeinen Fall, d.h. wenn auch Gleiten auftritt, ist $v_1 \neq v_v$.

Die allgemeine Gleichung für den Schlupf erhält man, indem die Gleichungen (19) und (19a) in die Gleichung für die Gleitgeschwindigkeit $v_g = v_1 - v_v$ eingesetzt werden. Die algebraische Subtraktion der örtlichen Geschwindigkeitsvektoren ist hier zulässig, da beide in der Druckzone parallel sind. Es ergibt sich

$$v_g = r_1 \cdot \omega_1 (1 + \epsilon_{t1}) - r_v \cdot \omega_v (1 + \epsilon_{tv})$$

und nach Umformen

$$\frac{r_v \cdot \omega_v}{r_1 \cdot \omega_1} = \left(1 + \epsilon_{t1} - \frac{v_g}{r_1 \cdot \omega_1} \right) / (1 + \epsilon_{tv})$$

Setzt man diesen Ausdruck in Gleichung (30a) für den Schlupf ein, so erhält man

$$s = \left(\epsilon_{tv} - \epsilon_{t1} + \frac{v_g}{r_1 \omega_1} \right) / (1 + \epsilon_{tv}) \quad (21)$$

Damit sind die Schlupfgleichungen für den Fall trocken aufeinander abrollender Walzen gegeben. Dehnungen und Gleiten sind hierbei die maßgebenden Faktoren.

Für die Untersuchungen des Rollverhaltens von Walzen, auf deren Oberfläche sich eine Flüssigkeitsschicht befindet, kann der Schlupf ebenfalls von maßgebender Bedeutung bei der Beantwortung der Frage sein, inwieweit zusätzliche Scherungen - z.B. durch Gleiten verursacht - auftreten und unter welchen Betriebsbedingungen solche Vorgänge stattfinden. Der Schlupf ist in jedem Fall ein Maß für die Scherungen in der Flüssigkeitsschicht, gleichgültig ob die Ursache für den Schlupf die Summe der Dehnungen von Gummioberfläche und Flüssigkeitsschicht ist - wobei letztere sich festkörperähnlich verhält - oder ob ein echtes makroskopisches Gleiten vorliegt. Die Gleichungen für diese Vorgänge in der Flüssigkeit sind jedoch andere als die bis jetzt hergeleiteten (vergl. Kap. 4.5).

Nimmt der Schlupf den Wert 1 an, so steht die Gummiwalze ($\omega_v=0$) und es wird keine Tangentialkraft mehr in der Druckzone übertragen. In diesem Fall des totalen Durchrutschens wird die max. zulässige Schubspannung in der Flüssigkeitsschicht überschritten und der Film parallel zur Oberfläche zerrissen.

Oder aber die Flüssigkeit wirkt wie ein Schmiermittel und die Haftreibung zwischen Gummi und Stahl wird soweit herabgesetzt, daß es zum Durchrutschen kommt.

Diese ausführlichen Erklärungen zum Phänomen Schlupf sollen helfen, die zahlreichen gemessenen Schlupfkurven zu interpretieren und zum anderen die Bedeutung von Schlupfmessungen bei der vorliegenden Problemstellung verdeutlichen.

4.2 Einführende Betrachtungen

Zum Verständnis der folgenden Vorgehensweisen ist es notwendig, einige Ergebnisse und Gedankengänge aus /19/ zusammengefaßt voranzustellen. Darin konnten durch Messungen an einem System Gummi-/Stahlwalze folgende Feststellungen getroffen werden:

1. Bei Druckfarbenschichtdicken von 2 bzw. 4 μm im Spalt ist für den Verlauf der Druckkraft als Funktion der Beistellung der Walzen allein das Belagmaterial der Gummiwalze maßgebend.
Die Druckkräfte zwischen den Walzen sind mit Druckfarbe etwas geringer als ohne Farbe. Die eine Druckfarbe kennzeichnenden Viskosimeterdaten (Viskositäten) ergeben keinen erkennbaren Einfluß.
2. Das gleiche gilt für die Abhängigkeit der Druckkraft von der Drehzahl. Auch hier ist in erster Linie das Belagmaterial maßgebend.
3. Die Antriebsmomente sind mit Farbe erheblich höher als ohne Farbe. Diese Tatsache kann auf das durch den Farbzug

entstehende zusätzliche Moment zurückgeführt werden. Es beinhaltet jedoch keine zusätzliche Scherbeanspruchung.

4. Der Schlupf als ein Maß für die Verformungen in der Druckzone wird bei den dünnen Farbschichten nicht durch die Farbe beeinflusst und unterscheidet sich kaum von den ohne Farbe gemessenen Kurven.

Als Erweiterung dieser Untersuchungen sollte bei dem vorliegenden Vorhaben festgestellt werden, ob diese Aussagen auch für größere Schichtdicken und bei rheologisch definierten Flüssigkeiten z.B. Ölen noch zutreffen. Größere Schichtdicken bis zu 30 μm treten in der oberen Hälfte der Walzenfarbwerke in der Nähe der Farbeinspeisung auf.

Die Tatsache, daß die mit einem Viskosimeter - speziell bei Rotationsviskosimetern - ermittelten Viskositäten keine echten Einflußgrößen auf die Vorgänge im Walzenspalt sind und sich daher auch keine systematischen Abhängigkeiten aufzeigen lassen, verwundert eigentlich nicht, wenn man die Phänomenologie beider Systeme heranzieht. Walzenspalt und Viskosimeter seien daher in einigen wesentlichen Punkten einander gegenüber gestellt:

- A) In einem Viskosimeter wird die Flüssigkeit einer reinen Scherung ausgesetzt, da ein Teil der Wandung steht und der andere sich bewegt.

Im Walzenspalt hingegen haben wir auf alle Fälle eine Druckbeanspruchung auf das Flüssigkeitselement, die gemäß der im Spalt herrschenden Druckverteilung bis zu einem Maximum ansteigt und zum Auslauf hin abfällt. Infolge dieser Druckbeanspruchung fließt eine frei bewegliche Flüssigkeit gemäß den Gesetzen der Hydromechanik. Die im Spalt befindliche Flüssigkeit ist aber am Fließen behindert z.B. durch Haften an den Oberflächen der beiden Walzen und durch die in den Spalt durch die Drehung hineintransportierte Farbe.

Die Behinderung des Fließens ist besonders bei kleinen

Schichten bis hinauf in die Größenordnung der Rauigkeitsspitzen sehr stark. Dies haben auch die photoanalytischen Untersuchungen (Kap. 3.4) bewiesen, wo es auch bei Stillstand der Walzen sehr lange dauerte bis die Farbe aus dem Spalt gedrückt wurde.

Zu diesem behinderten Fließen infolge Druckbeanspruchung kommt für die Übertragung der Momente im Spalt noch eine zusätzliche äußere Scherbeanspruchung. Ihre Größe ist normalerweise durch die Verluste von Lagern und viskoelastischem Belagmaterial bestimmt. Ihr Einfluß auf die Fließvorgänge kann jedoch zumindest bei dünnen Druckfarbenschichten nicht groß sein. Für weitere Aussagen sind die folgenden Untersuchungen heranzuziehen.

- B) Die Flüssigkeitsschichten in Viskosimetern (je nach Bauart bis in den mm-Bereich) sind wesentlich größer als im Walzenspalt (1-30 μm).
- C) Die Wandungen der Viskosimeter sind praktisch starr, können also einem sich aufbauenden Flüssigkeitsdruck nicht nachgeben.

Im Walzenspalt ist die Oberfläche der Gummiwalze weich elastisch und kann nachgeben, was in diesen Dimensionen von merklichem Einfluß auf die Spaltgeometrie ist. Interessanterweise führt diese Betrachtung bei hohen Geschwindigkeiten zu einer Annäherung der Spaltgeometrien, wie die Skizze in Abb. 25 zeigt.

Hier ist aufgezeigt der Unterschied zwischen der Spalthöhe beim Abrollen zweier starrer Walzen (h_s) und beim Abrollen zwischen Gummi- und Stahlwalze (h_v). Die Skizze beruht auf Berechnungen von DOBBELS /46/, der für verschiedene Geschwindigkeiten und eine Newton'sche Flüssigkeit die Spalthöhe zwischen Gummi- und Stahlwalze ermittelte.

Ab $n=20$ U/s ist die Spalthöhe praktisch konstant wie

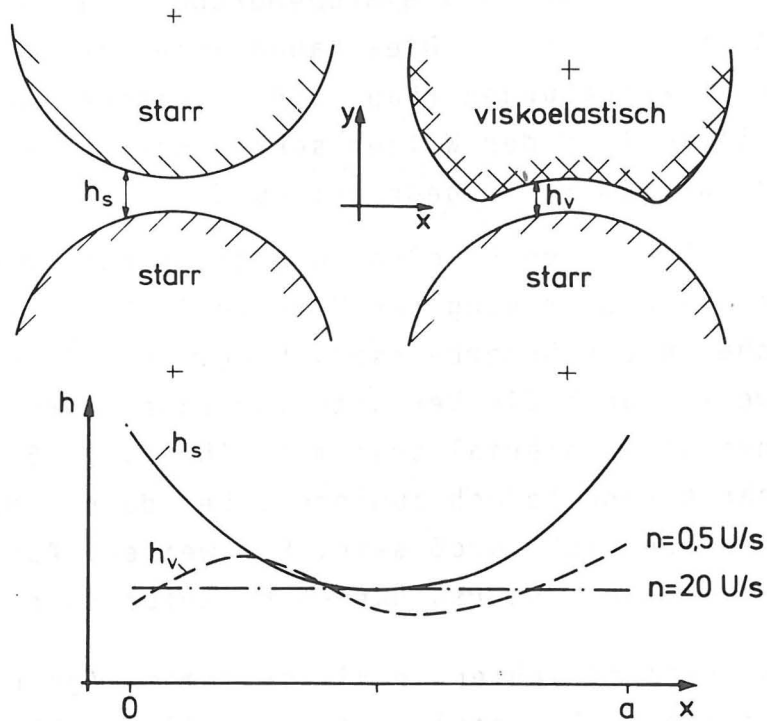


Abb. 25 Spaltgeometrie

z.B. bei einem Zylinderviskosimeter, nur bewegen sich die beiden Walzenoberflächen praktisch mit gleicher Geschwindigkeit.

- D) Ganz wesentliche Gesichtspunkte ergeben sich, wenn man die zeitlichen Abläufe betrachtet. Druckfarben sind aufgrund ihrer Zusammensetzung kolloide Dispersionen, deren Verhalten zeitabhängig ist.

Wird Druckfarbe zur Messung in ein Rotationsviskosimeter gegeben, so wird sie immer über eine Zeitdauer beansprucht, die lang ist gegenüber der Durchgangszeit durch den Spalt, auch wenn in den ersten Sekunden direkt gemessen und registriert wird. Die Durchgangszeit eines Druckfarbenelements durch den Walzenspalt liegt in der Größenordnung von 10^{-2} bis 10^{-3} Sekunden (Druckzonenbreite $a=5-10 \text{ mm}$; Umfangsgeschwindigkeit $1-10 \text{ m/s}$). In dieser kurzen Zeit ist an einem Flüssigkeitselement nur ein endlicher Verformungswinkel möglich, wie bei einem

sehr weichen Festkörper. Die Größenordnung der Verformung zeigt ein einfaches Rechenbeispiel:

In einer Flüssigkeit wächst der Scherungswinkel bei einer bestimmten Schubspannung mit der Zeit. Das Flüssigkeitselement, das ja nur einmal durch den Walzenspalt durchgeht, wird dieser Beanspruchung für $t = 10^{-3}$ s ausgesetzt. Es gilt:

$$\dot{\gamma} = \Delta\gamma / \Delta t = \Delta v / H \quad \text{oder} \quad \gamma = \frac{\Delta v \cdot t}{H}$$

Die den Farbfilm beanspruchende Differenz Δv läßt sich aus dem Schlupf s abschätzen:

$$s = \Delta v / v_0 \quad \text{oder} \quad \Delta v = s \cdot v_0$$

Aus Schlupfmessungen mit Farbe (vergl. Abb. 49) kann man folgende Zahlenwerte entnehmen (Annahme: nur Verformungsschlupf, kein Gleiten):

Gesamtschlupf $s = 0,75\%$ bei $v = 0,92$ m/s und $h = 10$ μm ; $H \approx 20$ μm ;

Trockener Schlupf: $s = 0,25\%$

Verformungsschlupf für Farbschicht $\Delta s = 0,50\%$

$$\gamma = \frac{0,0050 \cdot 0,92 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} = 0,23$$

Das entspricht immerhin einem Winkel von $\gamma = 13^\circ$. Die Verformung als Strecke angegeben beträgt für das Flüssigkeitselement ca. 4,6 μm .

Direkt anschließend an diese Schubverformung erfolgt die Spaltung dieses Flüssigkeitselements. Die Zeit bis zum nächsten Walzendurchgang des gerade gesparteten Flüssigkeitselements dauert etwa eine Größenordnung länger (10^{-1} bis 10^{-2} s) als der Durchgang durch den Spalt selbst. Die Farbe kann sich also durch freies Fließen an der Oberfläche rückverformen.

Dieser Zyklus von Scherung, Spaltung und Relaxation wiederholt sich im Farbwerk entsprechend der Anzahl der Spaltstellen 2 bis 10mal (neuere und ältere Farbwerkskonstruktionen).

Solche Vorgänge haben natürlich ihre Auswirkungen auf die Struktur der Farbe und damit auf die Größe der Materialkennwerte wie z.B. die Viskosität. Da die Druckfarben thixotrope Stoffe sind, spielen Veränderungen der Struktur für die Kennwerte eine maßgebende Rolle. Diese Tatsachen sind aus der Rheologie der Druckfarben bekannt und gehen aus Untersuchungen mit Hilfe von Rotationsviskosimetern hervor.

Hier wird die gleiche Farbe während der Umdrehungen des Meßkörpers ständig geschert. Je nach Meßdauer - die in jedem Fall wesentlich über der Durchgangszeit durch den Spalt liegt - kann sich die Struktur abbauen, die Schubspannung sinkt bei gleichbleibendem Schergefälle, d.h. die scheinbare Viskosität nimmt ab. Diese Vorgänge sind reversibel, in Ruhezeiten erholt sich die Farbe wieder.

Sehr kurzzeitige Meßvorgänge können nur an hochfrequenten Visko-Elastometern durchgeführt werden (10-150 KHz), mit denen Messungen gerade bis in den Bereich der Durchgangszeiten durch den Spalt möglich sind /4, 47/.

Die hier aufgeführten Unterschiede in Beanspruchungsart und Beanspruchungszeiten müssen bei einem komplexen Werkstoff wie der Druckfarbe ihre Auswirkungen auf die jeweils zugehörigen Kennwerte haben. Aus diesen Überlegungen wird bereits klar, daß die über ein Viskosimeter ermittelten Daten kleiner sein werden als die tatsächlich im Anwendungsfall wirksamen.

Die in den folgenden Kapiteln noch aufzuführende Vorgehensweise und die daraus resultierenden Messungen werden die oben genannte Interpretation bestätigen.

4.3 Die Versuchsflüssigkeiten

Die komplexe Substanz Druckfarbe und die schwierige Frage nach der im Spalt wirksamen Viskosität lassen es ratsam erscheinen, die Untersuchungen mit rheologisch einfacheren und leichter zu definierenden Stoffen zu beginnen.

Solche Stoffe sind rein Newton'sche Flüssigkeiten wie Wasser und bestimmte Öle. Eine derartige Vorgehensweise erleichtert die Interpretation und reduziert die Anzahl der möglichen Einflußgrößen dadurch, daß ein Problemkreis ausgeklammert werden kann und definierte Viskositäten vorliegen.

Bevor mit Druckfarbe gemessen wurde, wurden daher bekannte Eichöle mit Newton'schem Charakter und stark unterschiedlichen Viskositäten eingesetzt. Es handelte sich dabei um:
das Eichöl 3.000
das Eichöl 30.000
und Rupföl.

Die Rheogramme der 3 Öle zeigt Abb. 26 a, b, c.

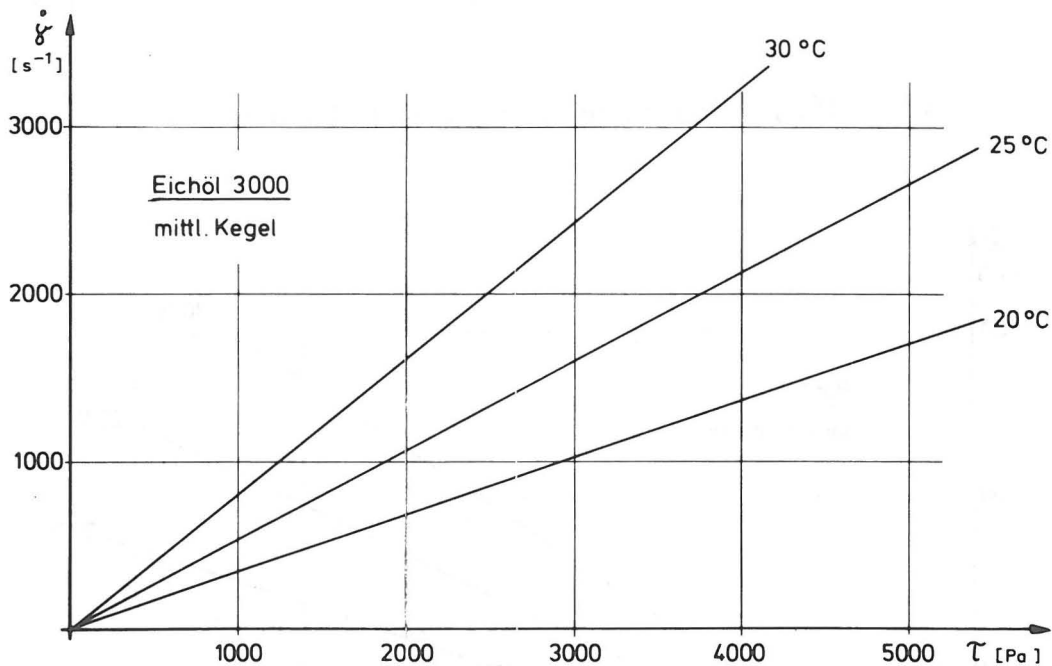


Abb. 26a) Rheogramm von Eichöl 3.000

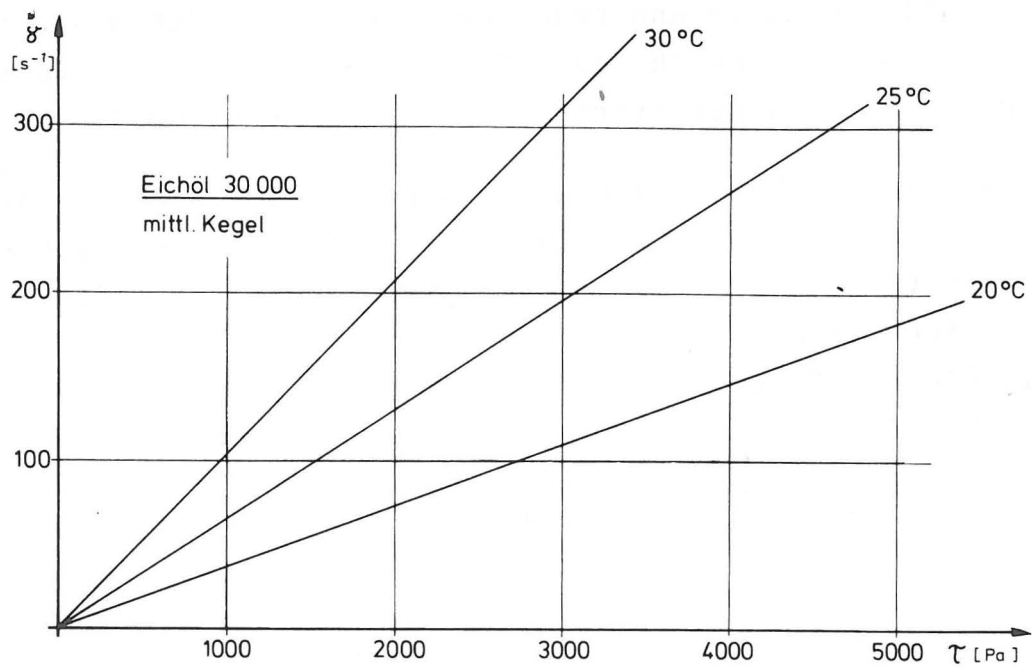


Abb. 26b) Rheogramm von Eichöl 30.000

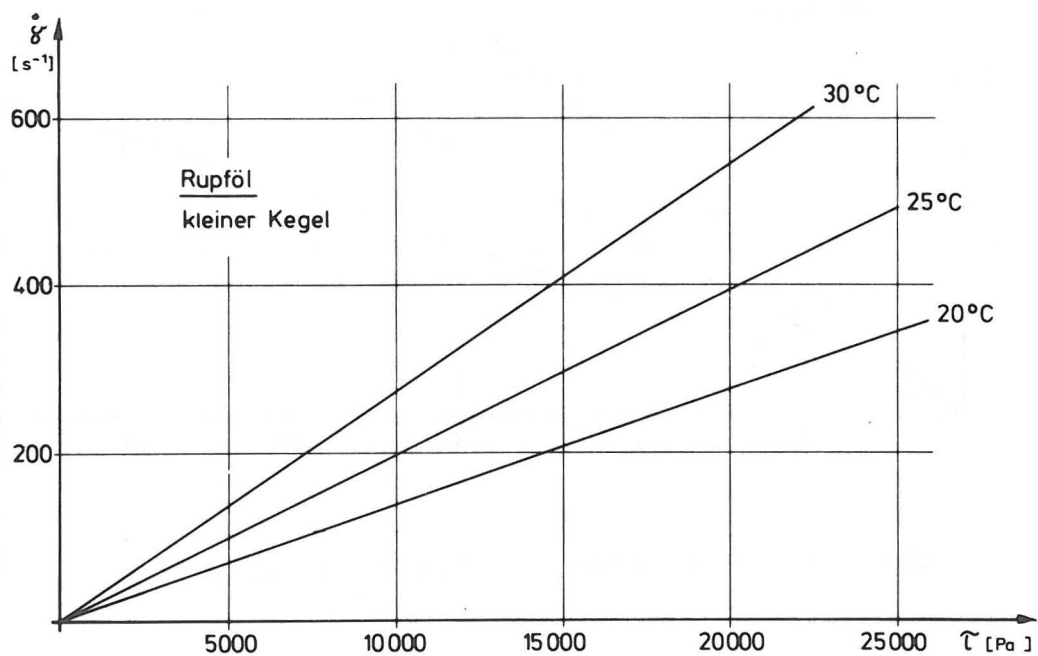


Abb. 26c) Rheogramm von Rupföl

Da beim Abrollen der Walzen infolge der viskoelastischen Verluste in dem Belagmaterial Wärme entsteht /39/, die sich auf die Flüssigkeit überträgt, muß die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur beachtet werden, um Abweichungen erklären zu können. Alle Kurven wurden in /48/ mit einem Kegel-Platte-Viskosimeter gemessen.

Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität der Öle ist in den Abb. 27 a, b, c dargestellt. Es ist ersichtlich, daß die sicher auftretenden Temperaturschwankungen beim Messen sehr starke Auswirkungen auf die Viskosität haben, da speziell im Bereich $25^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{C}$ die Kurven sehr stark abfallen. Trotz dieser Viskositätsminderung kommt man bei den Messungen mit einem Öl nie in den Bereich der Viskositäten des nächsten Öls, da die Unterschiede relativ groß gewählt wurden.

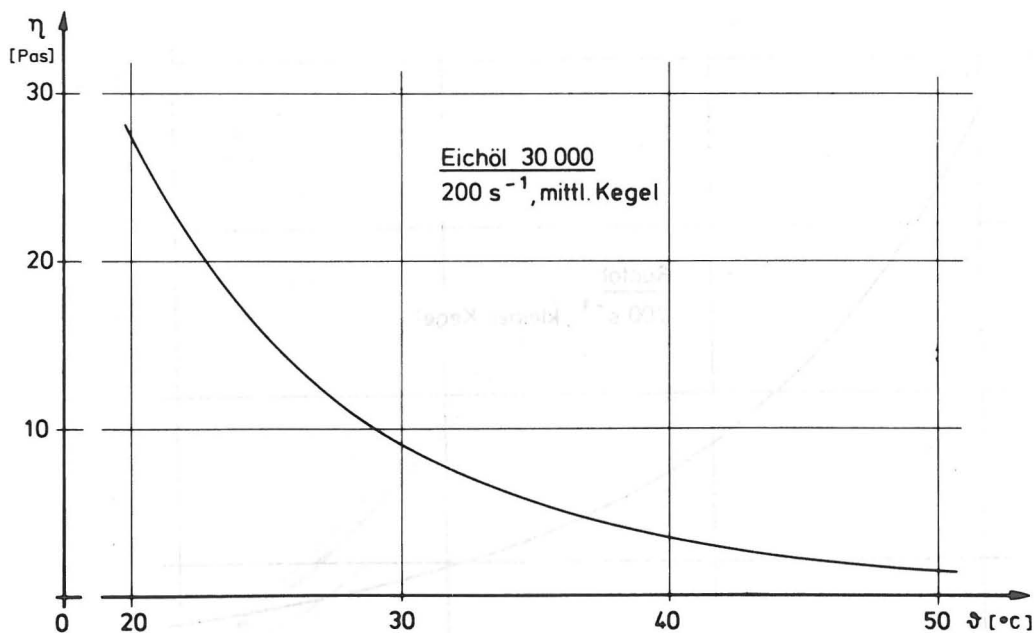


Abb. 27a) Temperaturabhängigkeit der Viskositäten von Öl 3.000

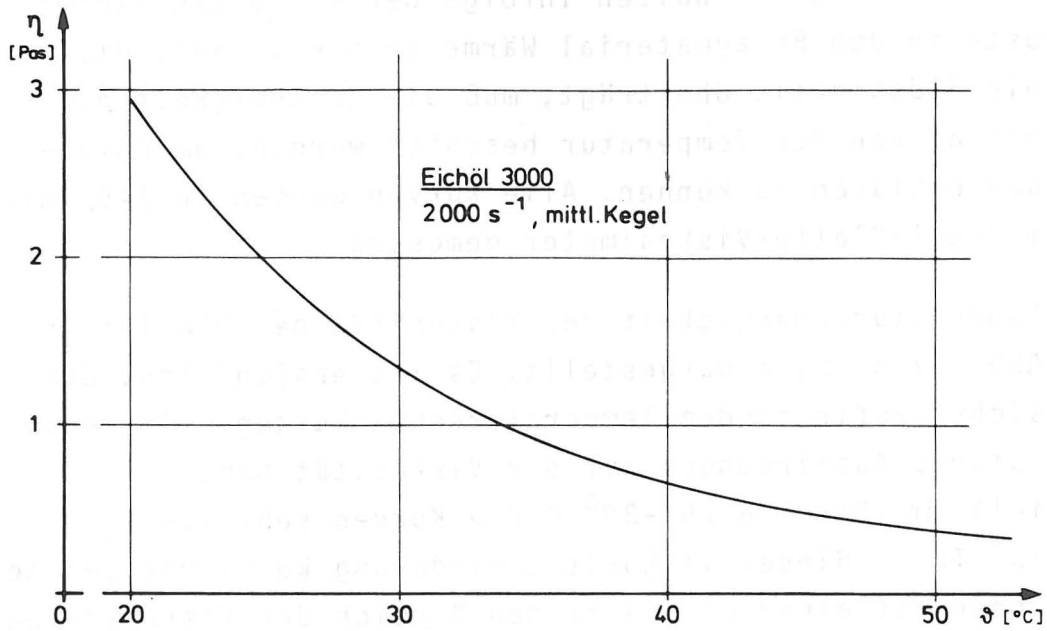


Abb. 27b) Temperaturabhängigkeit der Viskositäten
von Öl 30.000

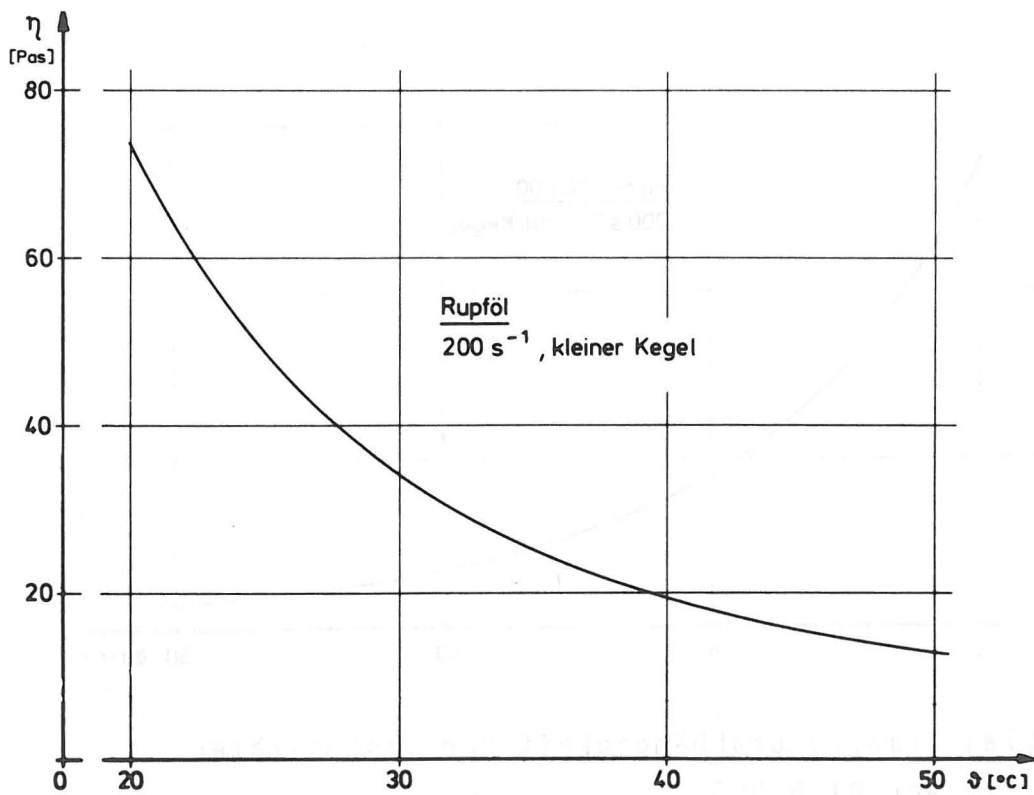


Abb. 27c) Temperaturabhängigkeit der Viskositäten
von Rupföl

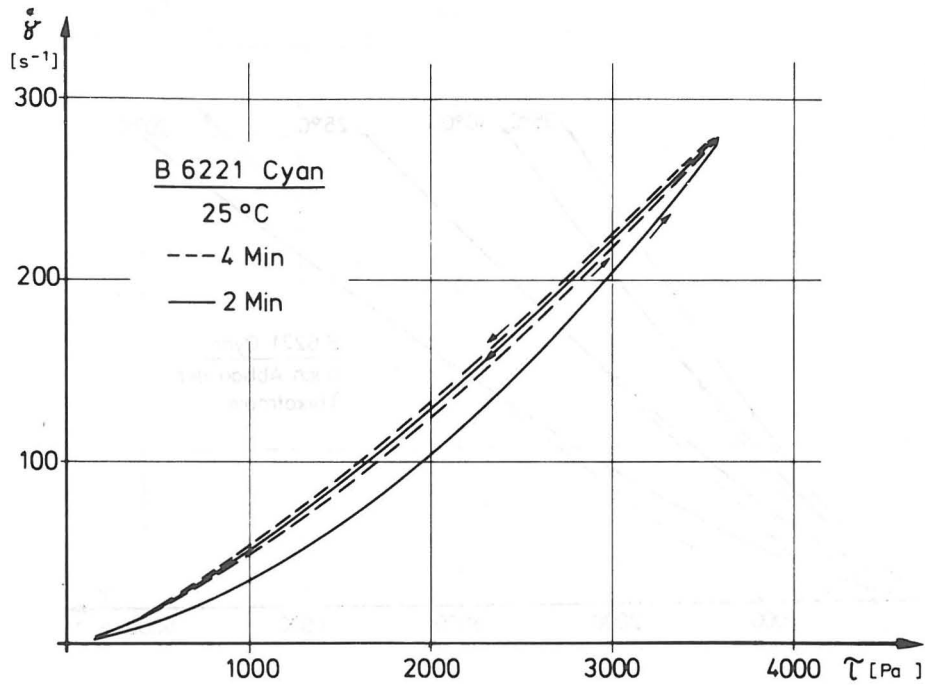


Abb. 28a) Rheogramme der Druckfarbe B6221

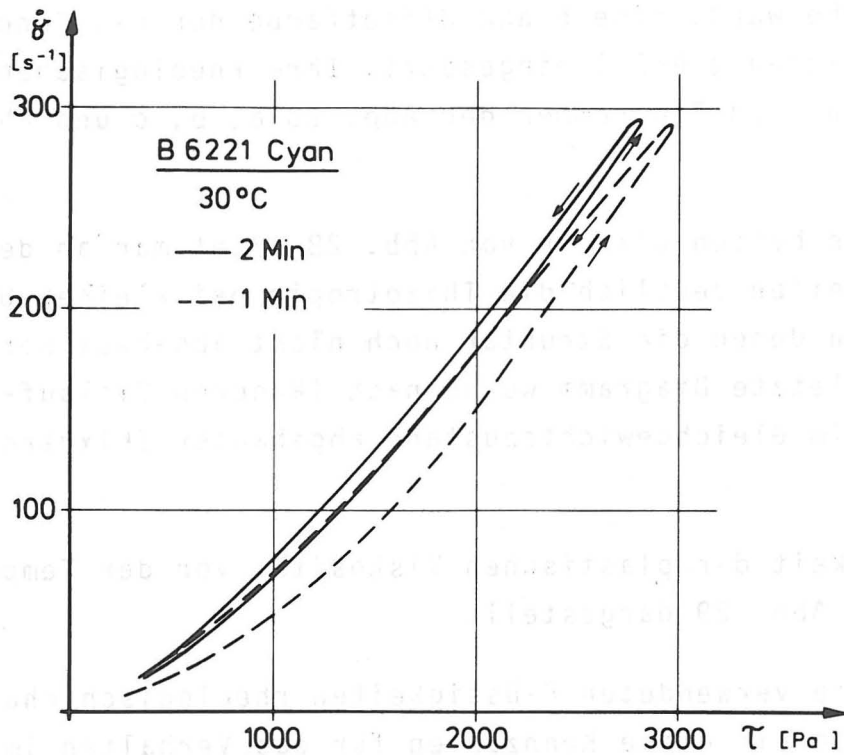


Abb. 28b) Rheogramme der Druckfarbe B6221

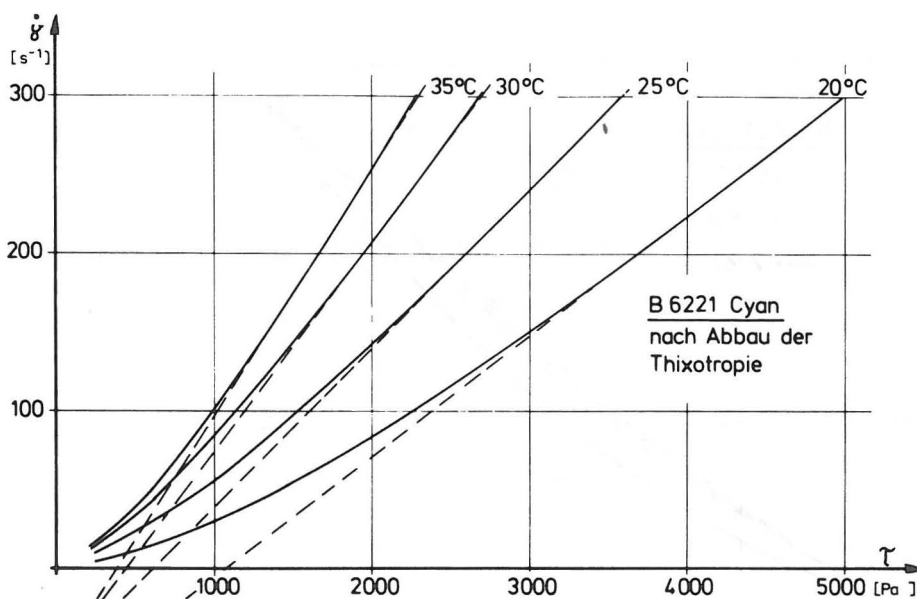


Abb. 28c) Rheogramme der Druckfarbe B6221

Als Druckfarbe wurde eine blaue Offsetfarbe der Fa. Concentra mit der Bezeichnung B6221 eingesetzt. Ihre rheologischen Daten sind aus den Diagrammen der Abb. 28 a, b, c und Abb. 29 ersichtlich.

In den ersten beiden Bildern von Abb. 28 sieht man an den Hystereseschleifen deutlich die Thixotropie bei kleinen Umfahzeiten in denen die Struktur noch nicht abgebaut werden konnte. Das letzte Diagramm wurde nach längeren Einlaufzeiten also im Gleichgewichtszustand abgebauter Thixotropie aufgenommen.

Die Abhängigkeit der plastischen Viskosität von der Temperatur ist in Abb. 29 dargestellt.

Damit sind die verwendeten Flüssigkeiten rheologisch charakterisiert. Wieweit diese Kennzahlen für das Verhalten im Spalt maßgeblich sind müssen die Messungen des Rollverhaltens zeigen.

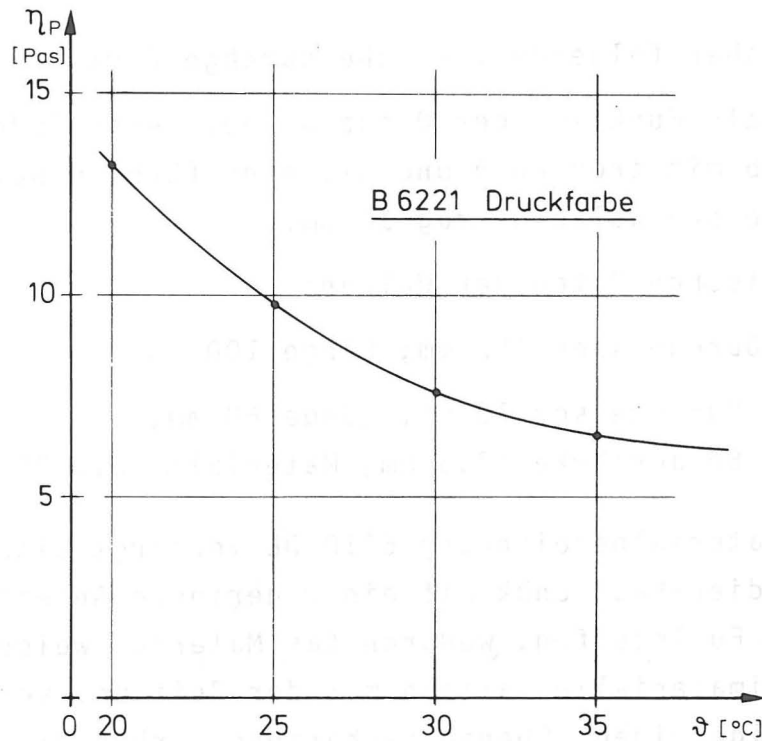


Abb. 29 Temperaturabhängigkeit der plastischen Viskosität von B6221

4.4 Ergebnisse der Druckkraftmessungen

In Erweiterung der Arbeiten von GLÜCK /19/ konnte mit der vorliegenden Versuchsanordnung untersucht werden, ob bei dickeren Farbschichten auf den Walzen neue z.B. hydrodynamische Effekte entstehen und ob die Druckkraft zwischen den Walzen wesentlich über die Zahlenwerte für eine trockene Walzenkombination ansteigt. Gleichzeitig war es möglich zu überprüfen, ob es einen charakteristischen Verlauf der Druckkraft gibt, für den auch bei dickeren Farbschichten die Eigenschaften des Belagmaterials verantwortlich sind.

In der Abhängigkeit der Druckkraft von der Anstellung und der Drehgeschwindigkeit sind die Eigenschaften des Belagmaterials über die Abhängigkeit des komplexen E-Moduls von beiden Variablen enthalten. Die Kurven ohne Farbe sind demnach die Basiskurven, von denen ausgehend die weiteren Betrachtungen erfolgen.

Es wurden daher folgende Versuche durchgeführt:

Druckkraft als Funktion der Drehzahl bei verschiedenen Beistellungen b mit trockenen und mit eingefärbten Walzen. Die Schichtdicke pro Walze betrug $12\text{ }\mu\text{m}$.

Die geometrischen Daten der Walzen:

Glaswalze: Durchmesser 152 mm; Länge 100 mm

Gummiwalze: Durchmesser 70 mm; Länge 68 mm;

Belagstärke 17,5 mm; Material: 6210 DE

Unter der Materialbezeichnung 6210 DE verbirgt sich ein Nitril-Butadien-Kautschuk mit einem geringen Anteil an anorganischen Füllstoffen, wodurch das Material weich ist. Solche Gummimaterialien altern mit der Zeit und verhärten dabei im allgemeinen. Ebenso verhärtend wirken die in den Gummi eindringenden Farbbestandteile, die beim Waschen der Walzen nicht vollständig herausgelöst werden.

Solche Effekte sind bei der Interpretation zu berücksichtigen, da sich die gesamten Messungen über zwei Jahre erstreckten und jetzt zugeordnete Messungen nicht immer direkt aufeinander folgend durchgeführt wurden. Weiterhin zu beachten ist, daß die Angabe für die Beistellung b nicht bei jeder Messung Anspruch auf den absolut richtigen Zahlenwert haben kann, da die Nullpunkteinstellung ausgesprochen problematisch ist und dazu noch Wärmeeffekte durch unterschiedliche Umgebungstemperaturen und - abhängig von der Versuchsdauer - differierende Walzentemperaturen kommen.

Das bedeutet, die Angabe einer Anstellung $b=0,4\text{ mm}$ in der Versuchsreihe 1 und einer Versuchsreihe 2 zu einem anderen viel späteren Zeitpunkt müssen nicht identisch miteinander sein. Hier sind Abweichungen von $\pm 0,05\text{ mm}$ durchaus möglich. Bei der Steilheit der Kurve $P=f(b)$ ergeben sich daraus aber beträchtliche Unterschiede in der zugehörigen Kraft. Da für eine einzelne Meßreihe jedoch immer der gleich Fehler gilt,

ist der qualitative Verlauf der Kurve richtig und kann für die Interpretation als zuverlässig herangezogen werden.

Der Vergleich mehrerer unterschiedlicher Meßreihen in Bezug auf die absolute Höhe der Zahlenwerte muß jedoch unter Beachtung der oben genannten möglichen Abweichungen vorgenommen werden.

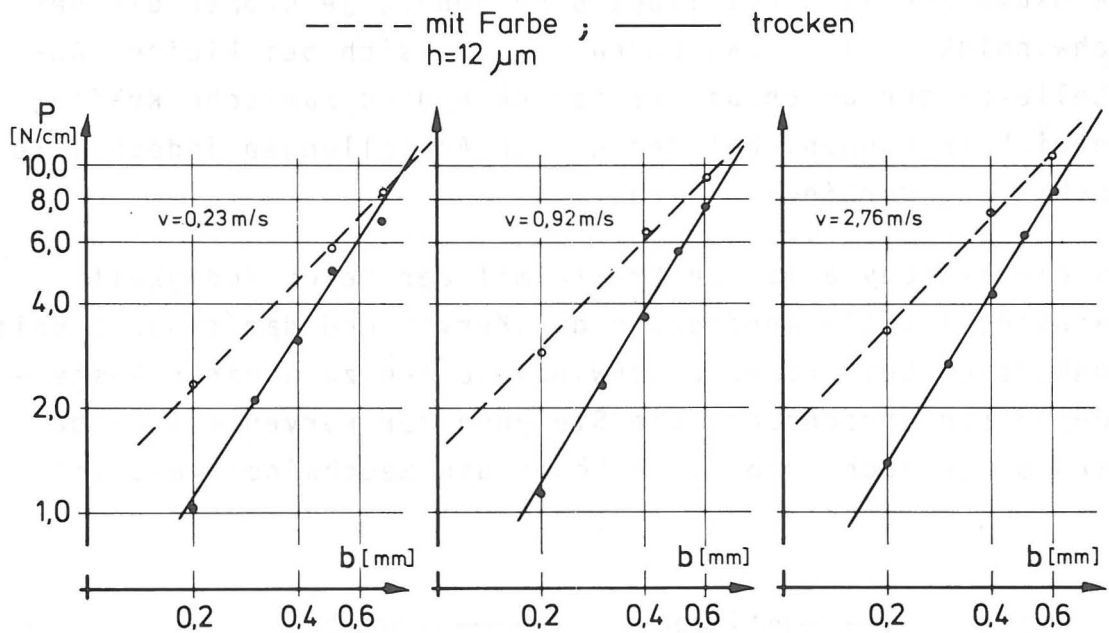


Abb. 30 Abhängigkeit der Druckkraft von der Anstellung bei doppellogarithmischer Auftragung

In Abb. 30 ist die Abhängigkeit der Druckkraft P bezogen auf 1 cm Walzenbreite von der Anstellung b in doppellogarithmischem Maßstab für 3 Geschwindigkeiten v dargestellt. Erwartungsgemäß ergeben sich für die trocken laufenden Walzen Geraden, deren Steigung ein Charakteristikum für das verwendete Belagmaterial ist. Daher sind alle 3 Geraden praktisch parallel.

Interessant hingegen sind die Kurven, die sich ergeben, wenn Farbe mit einer Summenschicht im Spalt von ca. $24\text{ }\mu\text{m}$ auf die Walzen gegeben wird. Die Kurvenpunkte sind Meßreihen entnommen, bei denen die Variable die Geschwindigkeit war und die Anstellung jeweils konstant gehalten wurde.

Offensichtlich übt die Farbe hier einen Einfluß aus, der sich bei den kleinen Anstellungen stark bemerkbar macht, bei großen Anstellungen jedoch gegenüber der ursprünglichen Kraft zwischen den Walzen verschwindet.

Auch ist dieser Einfluß bei höheren Geschwindigkeiten größer als bei kleinen.

Die Kurven nähern sich, je höher die Anstellung ist, der gemeinsame Schnittpunkt liegt umso höher, je größer die Geschwindigkeit ist. Das bedeutet, daß sich bei kleinen Anstellekräften durchaus zusätzlich hydrodynamische Kräfte entwickeln können, bei den großen Anstellungen jedoch ihre Ausbildung verhindert wird.

Da die hydrodynamischen Kräfte mit der Geschwindigkeit wachsen, ist die Annäherung der Kurven und damit der Schnittpunkt auch bei großen Geschwindigkeiten zu höheren Anstellungen hin verschoben. Die Steigung der Kurven mit Farbe wird daher auch größer, je höher die Geschwindigkeit ist.

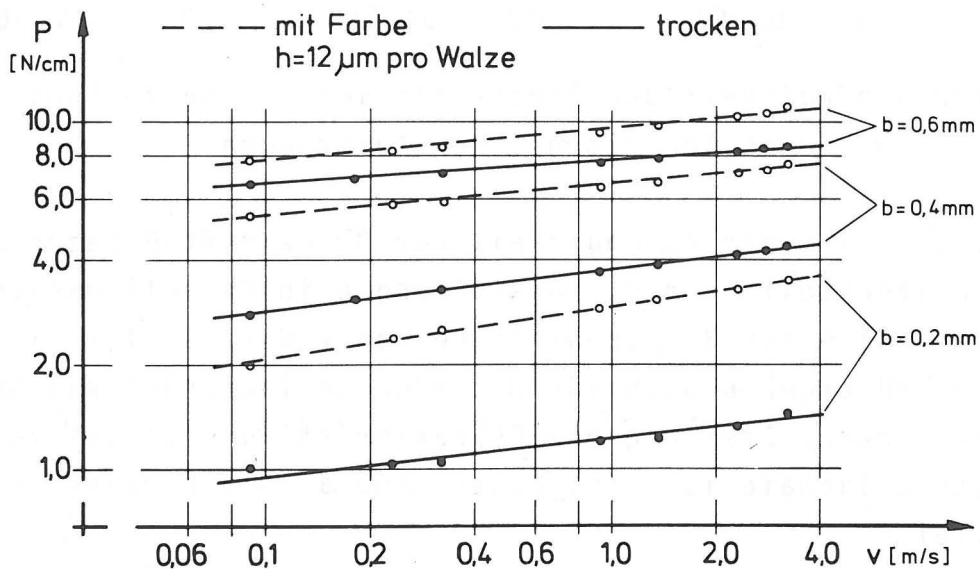


Abb. 31 Abhängigkeit der Druckkraft von der Geschwindigkeit (doppellogarithmisch)

In Abb. 31 sind die Abhängigkeiten zwischen den Druckkräften und verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten dargestellt. Bei diesen Kurven werden die früheren Erfahrungen bestätigt. Der flache Kurvenverlauf stammt aus der Abhängigkeit des E-Moduls des viskoelastischen Belagmaterials von der Verformungsgeschwindigkeit. Diese Charakteristik wird auch durch die Farbe nicht wesentlich verändert, insbesondere nicht bei den hohen Beistellungen, wo die Geraden mit und ohne Farbe praktisch parallel verlaufen. Bei $b=0,2$ mm hingegen divergieren die beiden zugehörigen Kurven auf der Seite der hohen Geschwindigkeiten. Demzufolge darf man unter diesen Bedingungen auf das Auftreten hydrodynamischer Kräfte schließen.

Aus dem Verlauf der dargestellten Abhängigkeiten sind bereits die ersten Interpretationen über den Wirkungsmechanismus von Farbe im Walzenspalt möglich.

4.5 Theoretische Ansätze zu den Schlupfmessungen

Aussagen darüber, welche Scherungen im Spalt auftreten, erhält man am besten über die Schlupfmessungen. Bevor jedoch die Meßergebnisse besprochen werden, sollen einige vereinfachte theoretische Betrachtungen vorangestellt werden, aus denen die Systematik der Verdurchsdurchführung deutlich wird.

Ausgangspunkt der Betrachtungen soll die Definition der Zähigkeit η nach dem newton'schen Ansatz sein.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = \eta \cdot D \quad (22)$$

mit $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ und $D = dv/dx$

Im Walzenspalt kann eine Schubspannung in der Flüssigkeit einmal als Folge des Anpreßdrucks zwischen den Walzen auftreten. Aus dem Gleichgewicht der Kräfte folgt für eine ebene Strömung:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{d\tau}{dx} = \eta \frac{d^2v}{dx^2} \quad (23)$$

Die durch die wirkenden Druckkräfte verursachten Fließvorgänge wurden bereits photoanalytisch in Kap. 3.4 untersucht. Infolge der Fließbehinderung in der Druckzone ergaben sich sehr kleine mittlere Geschwindigkeiten ($U_m = (0,5-5) \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) und ebenso geringe Schergefälle (Größenordnung 1 s^{-1}).

Da in der Druckzone ein äußeres Moment - bestehend aus Verlustmomenten infolge Lagerreibung und viskoelastischen Verlusten - übertragen werden muß, wirkt noch eine größere Tangentialkraft. Diese ist im Mehrwalzen-System wegen der verformungsbedingten Zwangsmomente noch um ein Mehrfaches höher als im Zweiwalzen-System /19/. Die Kraftübertragung im Spalt erfolgt über die Flüssigkeitsschicht und erzeugt dort eine Scherung.

Diese durch die Momentenübertragung induzierte Scherung kann man verstärkt herausarbeiten, wenn man im Zweiwalzen-System ein zusätzliches Bremsmoment an der Gummiwalze wirken läßt. Gleichzeitig erhält man damit eine Simulation für die fehlenden Zwangsmomente und damit einen praxisgerechten Bezug zum Walzenfarbwerk.

Die gesamte zusammen mit dem Bremsmoment M_B zu übertragende Tangentialkraft T beträgt:

$$T = \frac{1}{r_v} [M_v (1 + \frac{r_1}{r_v}) + M_{Lv} + M_B] = \frac{M_R}{r_v} \quad (24)$$

Die Momentensumme M_R in der eckigen Klammer kann nur dann etwa gleich M_B gesetzt werden, wenn das Bremsmoment groß gegenüber den beiden anderen Momenten gewählt wird. Die viskoelastischen Momente können bei Beistellungen bis $b=0,6 \text{ mm}$ immerhin bis $4 \text{ N}\cdot\text{cm}$ betragen, bei kleineren Anstellungen hingegen zwischen $0,8$ und $1,6 \text{ N}\cdot\text{cm}$ liegen /19 S. 104/. Zu

beachten ist jedoch der Radienfaktor von 3,14 bei den vorliegenden Verhältnissen.

Die Lagermomente werden bei einer maximalen Gesamtkraft von 60 N etwa bis max. 0,5 Ncm gehen.

Um die Variablen für die Schlupfmessungen herauszuarbeiten wird Gleichung (22) umgeformt auf meßbare Größen:

$$\tau = T/A = M_R / r_v \cdot A$$

wobei A die Scherfläche aus Walzenlänge L und Druckzonbreite a ist.

Aus der Schlupfgleichung (17) folgt:

$$\Delta v = s \cdot v$$

Für das Schergefälle $D = dv/dx$ ist - integral über die gesamte Spalthöhe H betrachtet - diese aus dem Schlupf zu ermittelnde Geschwindigkeitsdifferenz Δv einzusetzen, bezogen auf H.

Die Spalthöhe H ist etwa konstant über die Druckzonbreite (vergl. Skizze Abb. 25), was besonders gut für die relativ weiche Gummiwalze zutrifft. Da sich keine Farbe am Einlauf ansammelt, muß wegen der Gültigkeit der Kontinuitätsgleichung $H \approx 2h$ sein, mit h=Schichtdicke auf jeder Walze.

Damit wird aus Gl. (22):

$$\frac{M_R}{r_v} \cdot \frac{1}{A} = \eta \frac{s \cdot v}{H} \quad (22a)$$

oder umgeformt auf die Meßgröße s:

$$s = \frac{M_R}{r_v} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{H}{\eta \cdot v} \quad (25)$$

Aus dieser Gleichung sind alle Einflußgrößen ersichtlich. Wenn man nun nachweisen kann, daß diese Gleichung auf die Messungen anwendbar ist, dann ist mit den obigen Gleichungen eine theoretische Grundlage für die Vorgänge im Walzenspalt gefunden.

Bei den folgenden Messungen soll nun jeweils eine der Größen auf der rechten Seite von Gl. (25) systematisch variiert werden, wobei die anderen konstant gehalten werden.

Die Fläche A ändert sich nur mit der Beistellung b . Solange diese beibehalten wird, kann auch A als Konstante angesehen werden.

Ohne Bremsmoment hängt das Rollmoment vorwiegend von der Anstellung b ab, da sowohl das viskoelastische Moment als auch das Lagermoment über die Druckkraft in erster Linie von der Beistellung abhängen.

Bei konstanten Beistellungen und $M_B=0$ ist daher das Moment M_R praktisch eine konstante Größe.

4.6 Schlupfmessungen an trockenen Walzen

Ähnlich wie bei den Überlegungen zur Druckkraft ist es beim Schlupf erforderlich, sich zuerst ein Bild über die Verhältnisse bei trocken laufenden Walzen zu machen, wenn kein zusätzliches Bremsmoment wirkt. In einem solchen Fall haben wir es allein mit den Verformungen an der Oberfläche der Gummiwalzen zu tun (vergl. Gl. 20). Diese Verformungen hängen von den wirkenden Kräften ab. Es ist also sinnvoll, diesen ursächlichen Zusammenhang aufzutragen.

In Abb. 32 ist daher der Schlupf über der wirkenden Druckkraft grafisch dargestellt. Die sich ergebende Gerade entspricht den in /19/ Abb. 54 gefundenen Geraden für Walzen mit 15 und 20 mm Belagstärke und gleichem Belagmaterial.

Bei der für die in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Walze von 17,5 mm Belagstärke wurden geringere Druckkräfte gemessen als dort. Folgerichtig ist der Schlupfbereich auch kleiner. In Gleichungen von PARISH ist die tangentielle Dehnung für ein inkompressibles Material ($\nu=0,5$) auch proportional der wirkenden Druckkraft (vergl. /19/ S. 129).

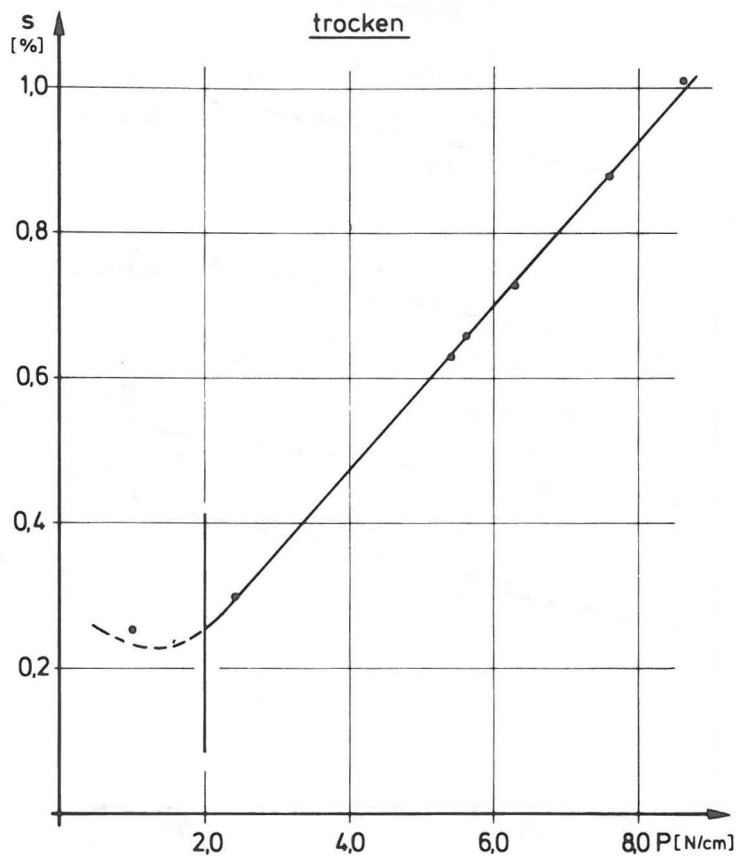


Abb. 32 Schlupf als Funktion der Druckkraft für trockene Walzen

Abb. 33 zeigt eine Auftragung des Schlupfs über der Umfangsgeschwindigkeit der Glaswalze. Hier liegt bei der trockenen Walze keine echte ursächliche Abhängigkeit mit der Variablen v vor, sondern sie spiegelt im Grunde genommen nur die Abhängigkeit der Druckkraft von der Drehzahl wieder. Da dieser Anstieg fast linear ist, ergeben sich für den Schlupf als Funktion der Geschwindigkeit Geraden.

Da für die Überlegungen mit Flüssigkeitsschichten zwischen den Walzen die Geschwindigkeit für die hydrodynamischen Kräfte und auftretenden Schergefälle eine Rolle spielt (vergl. auch Ansätze in Kap. 4.5), benötigt man als Interpretationshilfe der Kurven $s=f(v)$ in Abb. 33.

Zu den Kurven selbst ist folgendes zu sagen: Für die Anstel-

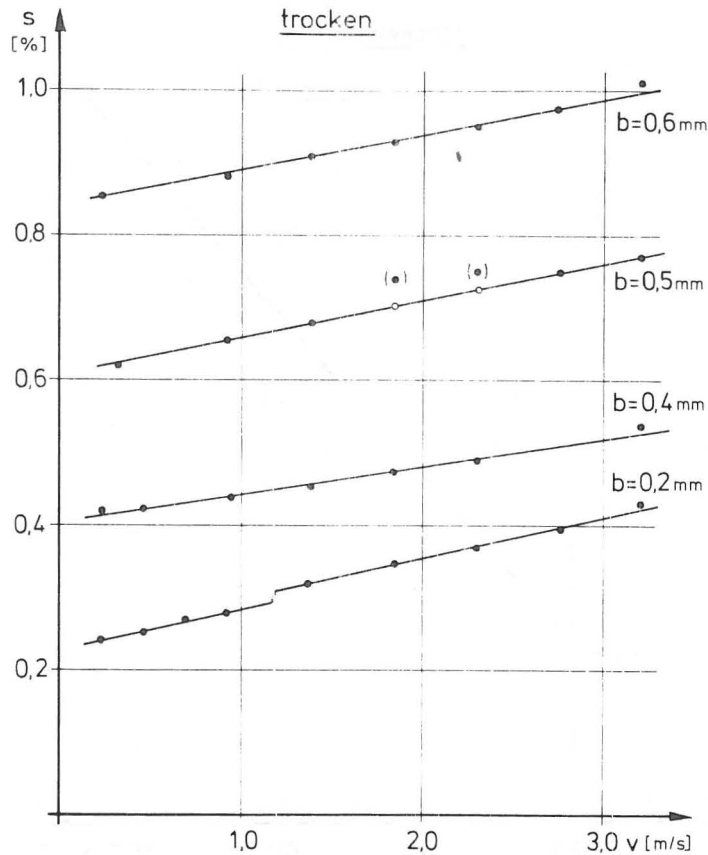


Abb. 33 Schlupf über der Geschwindigkeit für trockene Walzen aufgetragen

lung $b=0,2$ mm liegen 2 Geradenstücke vor. Der eingezeichnete Sprung kommt von einer Aufhebung des Lagerspiels bei Überschreiten einer bestimmten Druckkraft, die auch in diesem Bereich springt. Der dadurch bedingte Unterschied zwischen gemessener und tatsächlicher Anstellung liegt bei $\Delta b=0,015$ mm für $\Delta P=0,2$ N/cm.

Zu den beiden außerhalb der Geraden für $b=0,5$ mm liegenden Kurvenpunkten bleibt festzustellen, daß hier die zugehörige Druckkraft auch zu hoch ist. Ermittelt man nämlich den Schlupf für die nach Abb. 30 "richtige" Druckkraft bei $b=0,5$ mm, so liegt dieser Schlupf genau auf den eingetragenen Geraden.

4.7 Schlupfmessungen mit Ölen

Bringt man eine Flüssigkeit zwischen Gummi- und Stahlwalze, die gegeneinander angestellt sind, so ist zu erwarten, daß verschiedene physikalische Vorgänge mit unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten gleichzeitig stattfinden. Da das Meßverfahren aber nur die resultierende Wirkung zu erfassen imstande ist, ist eine Interpretation außerordentlich schwierig, zudem die Konstanz und Reproduzierbarkeit der Meßbedingungen - und damit die Voraussetzung für eine gegenseitige Vergleichbarkeit - nur schwer zu erreichen ist.

Mit der Betrachtung der trocken laufenden Walzen konnten die Gesetzmäßigkeiten für Kraft und Verformung isoliert erarbeitet werden. Die Walzenoberflächen haften hier aufeinander, es findet lediglich ein Mikrogleiten im Bereich der Verformungen statt.

Gibt man nun eine Flüssigkeit auf die Walzen, so muß man sich fragen, wieweit dieser Mechanismus gestört oder gar unterbunden wird. Die Öle wurden deshalb zuerst eingesetzt, da sie newton'sche Flüssigkeiten sind und der Ausgangspunkt der Schlupfbetrachtungen mit Flüssigkeiten das Newton'sche Gesetz war (Kap. 4.5).

Eine gute erste Überprüfung für die Verhaltensweise des neuen Systems bieten auch hier die Abhängigkeiten zwischen Kraft, Anstellung und Schlupf, wie sie bereits für die trockenen Walzen vorliegen.

In Abb. 34 ist daher die Abhängigkeit der Druckkraft von der Anstellung in doppellogarithmischem Maßstab aufgetragen, wenn das niedrig viskose Öl 3.000 in einer Schicht von $h=12\text{ }\mu\text{m}$ auf den Walzen liegt. Es ergeben sich wie in Abb. 30 Geraden, deren Steigung zwischen der Steigung für die trockenen Walzen und derjenigen für die eingefärbten Walzen liegt. Vom Zahlenwert her liegen die Druckkräfte mit Öl über denen der trockenen Walzen.

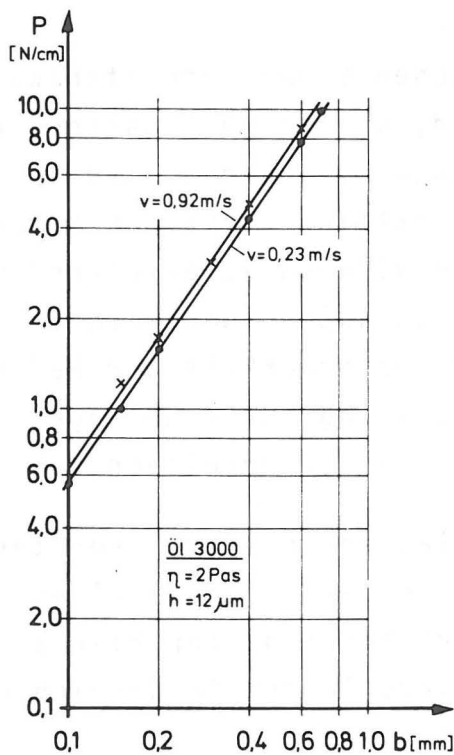


Abb. 34 Abhängigkeit der Druckkraft von der Anstellung mit Öl zwischen den Walzen

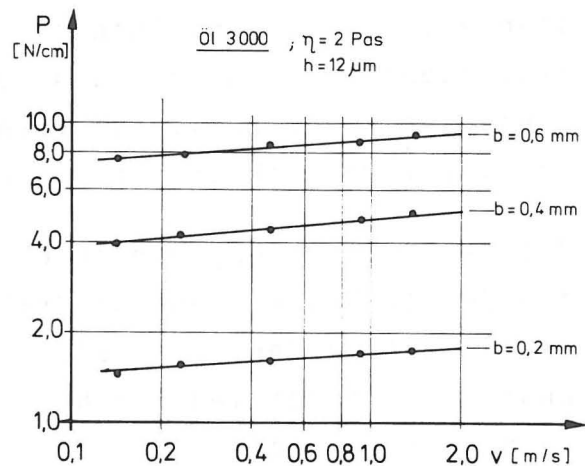


Abb. 35 Abhängigkeit der Druckkraft von der Geschwindigkeit mit Öl zwischen den Walzen

Das gleiche gilt für die Abhängigkeit der Druckkraft von der Umfangsgeschwindigkeit, die für verschiedene Beistellungen in Abb. 35 ebenfalls doppellogarithmisch dargestellt ist. Der direkte Vergleich mit Abb. 31 für die trockene und die eingefärbte Walzenpaarung zeigt die gleiche Charakteristik ohne hydrodynamische Kraftentstehung, sondern im Grunde genommen nur den viskoelastischen Anstieg.

Die Kraftverläufe zwischen den Walzen sind noch relativ unempfindlich gegenüber einer Beschickung mit Flüssigkeit. Die Verhältnisse ändern sich jedoch stark, wenn man den Schlupf in die Betrachtungen einbezieht.

Da bei den trockenen Walzen der Schlupf rein aus der Verformung der Gummioberfläche resultiert und dafür die Kraft

verantwortlich ist, wurde zur Überprüfung der Zusammenhänge auch für die mit Öl beschickten Walzen der Schlupf über der

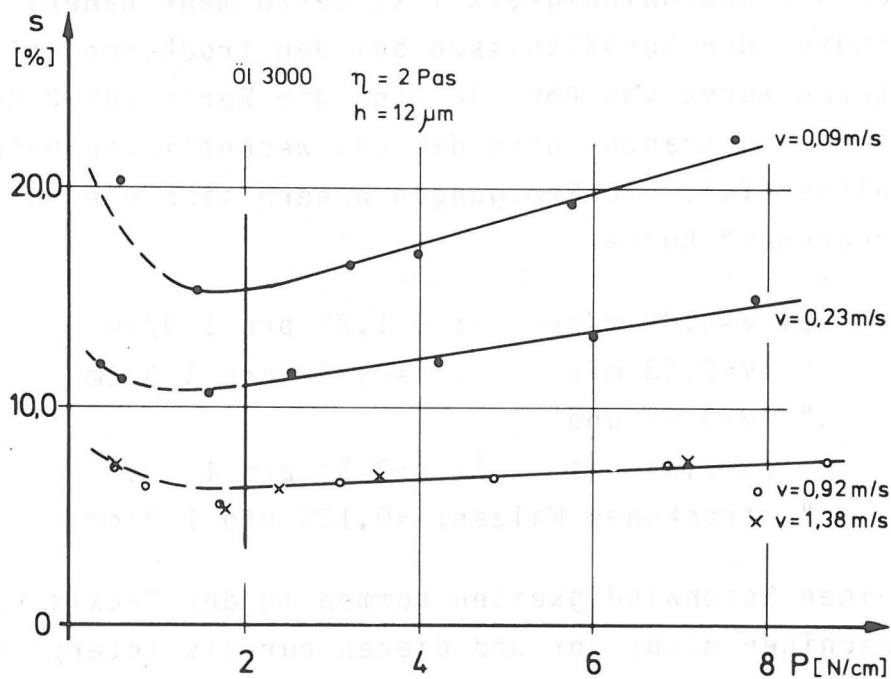


Abb. 36 Schlupf als Funktion der Druckkraft mit Öl zwischen den Walzen

Kraft aufgetragen (Abb. 36). Parameter ist die Geschwindigkeit. Abgesehen von dem Bereich geringer Druckkräfte (unter 2 N/cm) kann man auch hier einen linearen Verlauf feststellen, und zwar bei Anpreßkräften wie sie in der Praxis in Farbwerken auftreten dürften (2-6 N/cm). Der Vergleich mit Abb. 32 für die trockene Walzenpaarung zeigt jedoch sofort die beiden auffallenden Unterschiede. Zum einen ist jetzt plötzlich die Geschwindigkeit, mit der die Walzen aufeinander abrollen, ein wesentlicher Parameter, zum anderen liegen die Schlupfwerte selbst in einer ganz anderen Größenordnung, besonders bei den sehr kleinen Geschwindigkeiten.

Die feststellbare starke Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - besonders im Bereich $v < 1 \text{ m/s}$ - beweist, daß hier die

Gesetze fließender Flüssigkeiten gelten und weniger die viskoelastische Festkörpermechanik.

Je höher die Geschwindigkeit ist, desto mehr nähert sich die Schlupfkurve den Verhältnissen bei den trockenen Walzen. In der unteren Kurve von Abb. 36 sind die Werte für 2 Geschwindigkeiten eingetragen, ohne daß ein wesentlicher Unterschied feststellbar ist. Die Steigungen nähern sich ebenfalls denen der "trockenen" Kurve.

Steigung bei $v=0,09$ m/s	: $s=1,2\%$ pro 1 N/cm
" " $v=0,23$ m/s	: $s=0,46\%$ pro 1 N/cm
" " $v=0,92$ und	
1,38 m/s	: $s=0,2\%$ pro 1 N/cm
" " trockenen Walzen:	$s=0,12\%$ pro 1 N/cm

Die kleinen Geschwindigkeiten kommen in der Praxis von Druckmaschinen nicht vor und dienen nur als Interpretationshilfe für mögliche Zustände und Vorgänge im Walzenspalt.

Bei höheren Geschwindigkeiten sank der Schlupf rapide bis fast auf die Werte bei trockenen Walzen. Dafür gibt es zwei Gründe: zum einen wird bei höheren Geschwindigkeiten Öl von der Walzenoberfläche geschleudert und damit die Schichtdicke während des Laufs verringert bis zum nahezu trockenen Zustand.

Zum anderen führt der physikalische Sachverhalt selbst bei hohen Geschwindigkeiten zu niedrigen Schlupfwerten. Damit ergibt sich in der Tendenz eine Übereinstimmung mit den Erkenntnissen in /19/, wo bei $2\text{ }\mu\text{m}$ Schichtdicke und 2 bzw. 4 m/s gemessen wurde und der Schlupf mit Öl oder Farbe sich nicht merklich von dem der trocken laufenden Walze unterschied.

Im Gebiet kleiner Druckkräfte steigt der Schlupf ebenfalls wieder stark an. Der Grund dafür dürfte eintretendes Gleiten sein. Auf keinen Fall handelt es sich hier um Verformungsschlupf. Diese Tendenz ist auch bei trockenen Walzen festzustellen.

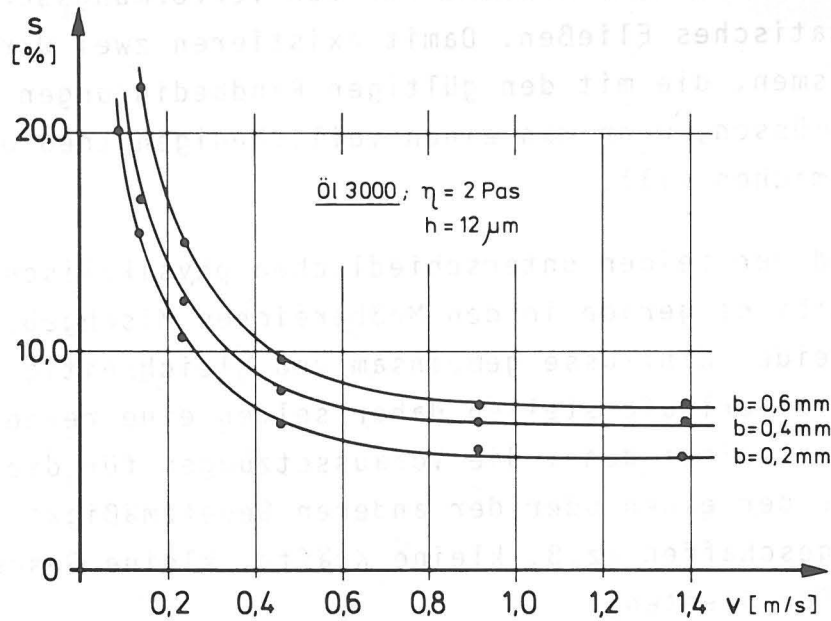


Abb. 37 Schlupf als Funktion der Geschwindigkeit mit Öl zwischen den Walzen

Der Einfluß der Geschwindigkeit auf den Schlupf ist in Abb. 37 noch einmal gesondert dargestellt, wobei die Beistellung - und damit die Druckkraft - Parameter ist. Der steile Abfall bei kleinen Geschwindigkeiten entspricht den vorgenannten Erkenntnissen. Es muß auch hier Gleiten als wesentliche Schlupfursache angenommen werden, da so große Verformungen selbst in der Flüssigkeitsschicht nicht möglich sind. Bei höheren Geschwindigkeiten wird der Schlupf nahezu konstant und sinkt auf Werte, die von reinen Verformungen stammen können.

Vergleicht man diese Betrachtungen und die Meßergebnisse mit den theoretischen Ansätzen, so gilt die umgekehrt proportionale Abhängigkeit von v nach Gl. (25) offensichtlich im Bereich kleiner Geschwindigkeiten, also dort wo Scherung infolge von Gleiten auftritt, recht gut.

Eine Abhängigkeit von der Druckkraft kennt die aus dem Newton'schen Gesetz hergeleitete Gl. (25) natürlich nicht. Die

Druckkraft ist mehr Ursache für den Verformungsschlupf und hydrostatisches Fließen. Damit existieren zwei Wirkungsmechanismen, die mit den gültigen Randbedingungen verknüpft werden müssen, wenn man einen vollständigen theoretischen Ansatz machen will.

Aufgrund der beiden unterschiedlichen physikalischen Vorgänge gibt es gerade in den Meßbereichen Mischgebiete, in denen beide Einflüsse gemeinsam und gleichzeitig wirken. Die Kurvenverläufe stellen daher selten eine reine Abhängigkeit dar, es sei denn, die Voraussetzungen für die Gültigkeit nur der einen oder der anderen Gesetzmäßigkeit werden bewußt geschaffen (z.B. kleine Kräfte, kleine Geschwindigkeiten für Gleiten).

Ein solcher Weg soll ebenfalls noch beschritten werden, wenn eine bewußte Scherung über von außen aufgebrachte Bremsmomente eingeleitet wird.

Im folgenden soll aber zuerst einmal der Einfluß weiterer wichtiger Größen untersucht werden, wobei jetzt klargestellt ist, daß Gleit- und Verformungsschlupf gemischt auftreten und keine reinen Verläufe zu erwarten sind.

4.7.1 Der Einfluß der Schichtdicke

Es wurde bereits erwähnt, daß durch Vernebeln von Öl bei hohen Geschwindigkeiten die Ölmenge und damit die Schichtdicke auf den Walzen geringer wurde und - davon ausgehend - der Schlupf sich dem der trockenen Walzen näherte.

Den Einfluß der Schichtdicke erkennt man aus den Abb. 38a, b, in denen der Schlupf zwar über der Geschwindigkeit aufgetragen, die Schichtdicke aber Parameter ist. Niedrige Schichten und praxisnahe Geschwindigkeiten ergeben Schlupfwerte wie sie bei trockenen Walzen auch auftreten. Bei hohen Schichten hingegen und niederen Geschwindigkeiten tritt sehr starkes Gleiten auf.

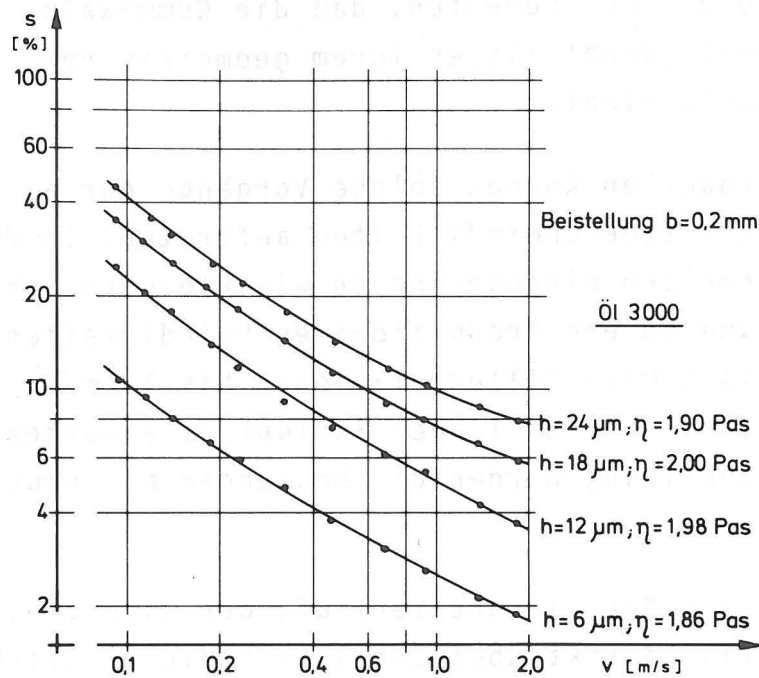


Abb. 38a) Schlupf als Funktion der Geschwindigkeit $b=0,2\text{ mm}$
Parameter: Schichtdicke

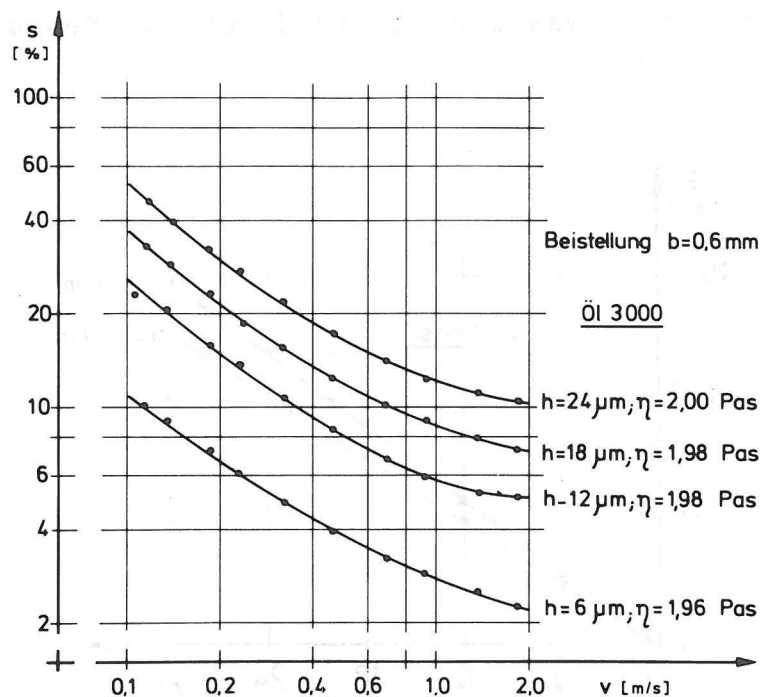


Abb. 38b) Schlupf als Funktion der Geschwindigkeit $b=0,6\text{ mm}$
Parameter: Schichtdicke

Schlupfwerte bis 50% bedeuten, daß die Gummiwalze nur noch halb so schnell dreht als es ihrem geometrischen Abwicklungsverhältnis entspricht!

In Walzenfarbwerken können solche Vorgänge nur am Ductor bei langsamen Schrittgeschwindigkeiten auftreten. In der Nähe der Auftragswalzen hingegen haben wir kleinere Schichten (bis $6\text{ }\mu\text{m}$) und höhere Produktionsgeschwindigkeiten (Bogenmaschinen bis 5 m/s ; Rollenrotationen bis 10 m/s) und damit geringen, wenn auch merklichen Schlupf zu erwarten. Eine genauere Nachbildung werden die Messungen mit Druckfarbe noch bringen.

Interessant ist der lineare Verlauf, der sich ergibt, wenn man den Schlupf direkt über der Schichtdicke aufträgt wie in Abb. 39 für $v=1\text{ m/s}$ und die Beistellungen $b=0,2$ und $0,6\text{ mm}$ dargestellt. Da Viskosität, Rollmoment und Fläche wegen konstanter Beistellung sowie Geschwindigkeit gleich gehalten wurden, ist der Schlupf nach Gl. (25) proportional zur Schichtdicke h , was qualitativ durch die Messungen bestätigt wird.

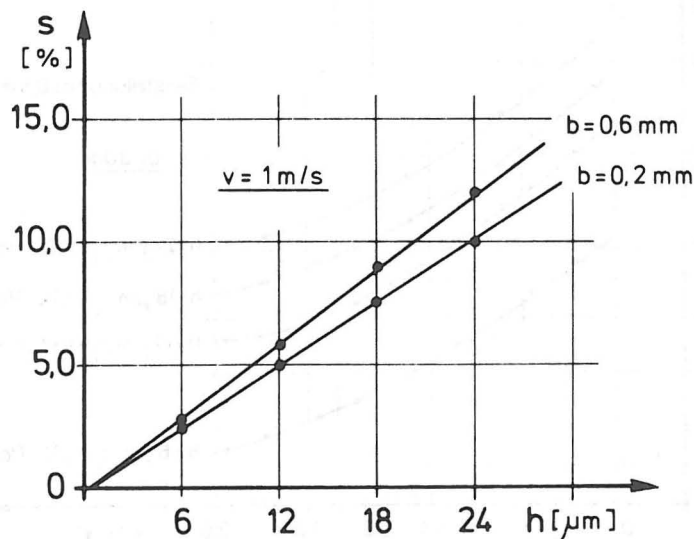


Abb. 39 Schlupf in Abhängigkeit von der Schichtdicke mit Öl auf den Walzen

Bei doppellogarithmischer Auftragung des Schlupfs über der Geschwindigkeit müßten sich bei strenger Gültigkeit von Gl. (25) Geraden mit negativer Steigung ergeben. Diese können jedoch nur in Bereichen kleiner Geschwindigkeit gefunden werden. Die vielfältigen Mischformen für den Schlupf machen eine so einfache theoretische Ableitung allerdings auch unwahrscheinlich.

4.7.2 Der Einfluß der Viskosität

Um den Einfluß der Viskosität zu untersuchen, wurden die drei in Kap. 4.3 vorgestellten Öle eingesetzt und Messungen des Schlupfs in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit durchge-

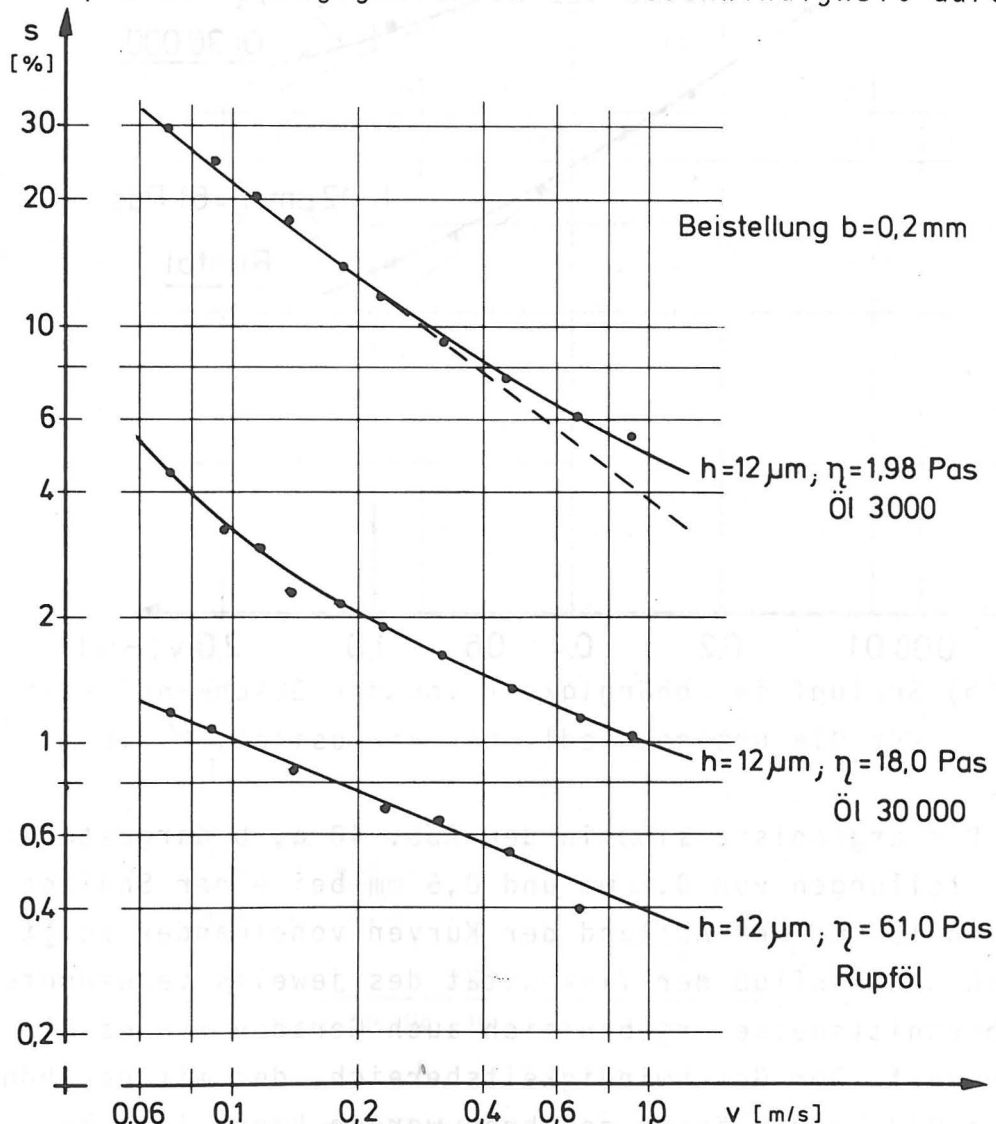


Abb. 40a) Schlupf in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für Öle unterschiedlicher Viskosität, $b=0,2\text{ mm}$

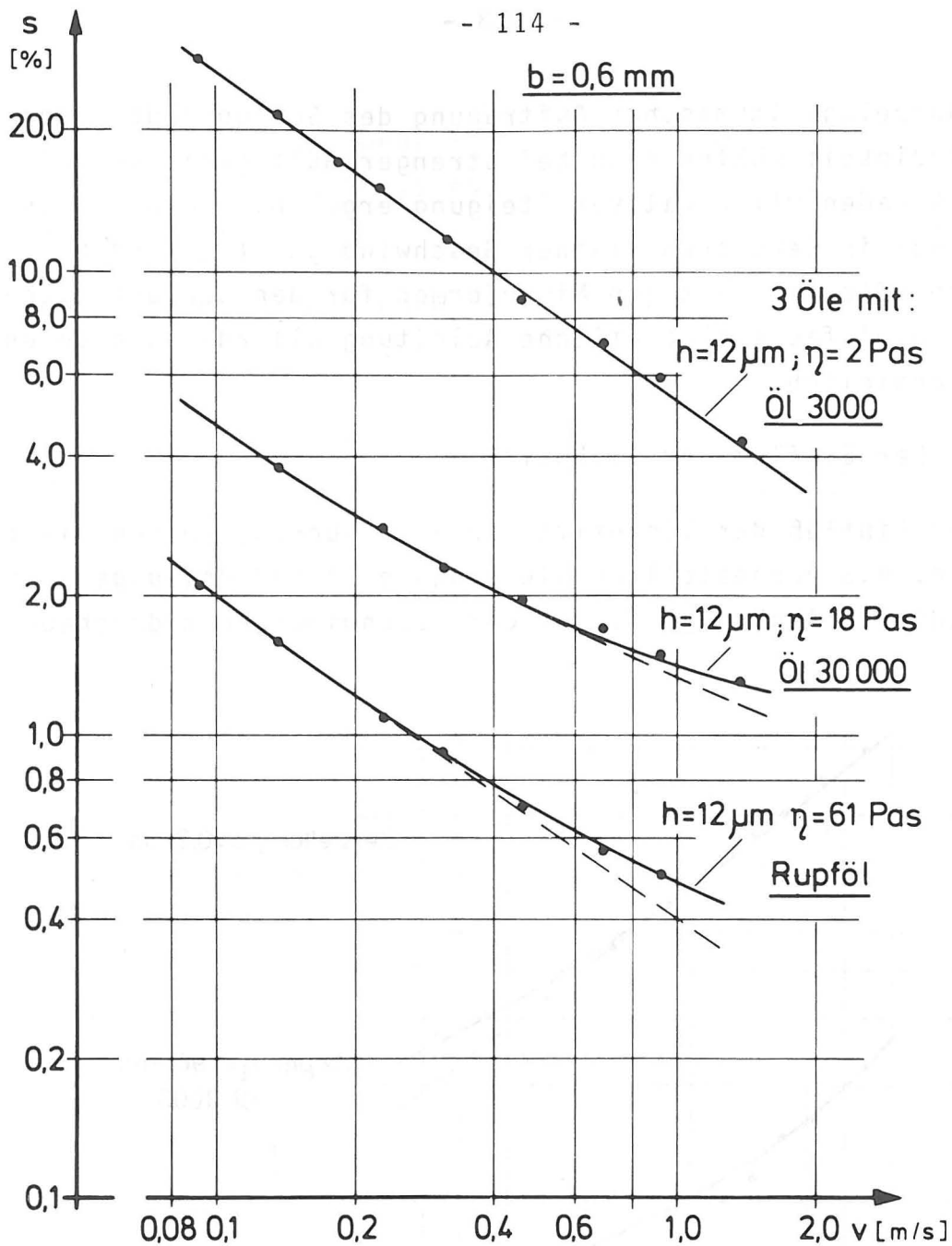


Abb. 40b) Schlupf in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für Öle unterschiedlicher Viskosität, $b = 0,6 \text{ mm}$

führt. Die Ergebnisse sind in den Abb. 40 a, b dargestellt für Beistellungen von $0,2 \text{ mm}$ und $0,6 \text{ mm}$ bei einer Schichtdicke von $12 \mu\text{m}$. Der Abstand der Kurven voneinander zeigt deutlich den Einfluß der Viskosität des jeweils verwendeten Öls. Abschnittsweise ergeben sich auch Geraden wie es Gl. (25) fordert. Der Geschwindigkeitsbereich, der mit den höher viskosen Ölen zuverlässig gefahren werden kann, ist eher noch kleiner als zuvor. Für die Verlässlichkeit der Meßwerte

spielt jedoch außer dem Ölmengenverlust noch eine weitere Größe eine wichtige Rolle und zwar die Temperatur. Deren Wirkung wird erst jetzt in Verbindung mit den Abb. 40 und 41 klar, da hier der starke Einfluß der Viskosität sichtbar wird.

Die Abb. 41 a, b wurden aus den Abb. 40 a, b gewonnen, indem Schnitte an den Stellen $v=0,2$ und 1 m/s gelegt wurden. Damit ist es möglich, die Abhängigkeit des Schlupfes von der Viskosität direkt darzustellen. Es ist auch hier erstaunlich, wie gut die qualitative Übereinstimmung mit Gl. (25) ist. Ihr zufolge ist bei sonst konstanten Bedingungen der Schlupf umgekehrt proportional zur Viskosität, was bei logarithmischer Darstellung zu Geraden mit negativer Steigung führt. Die Meßergebnisse folgen dieser Gesetzmäßigkeit überraschend gut.

Den Diagrammen aus Abb. 41 wird später bei den Messungen mit Druckfarben noch eine besondere Bedeutung zugewiesen werden.

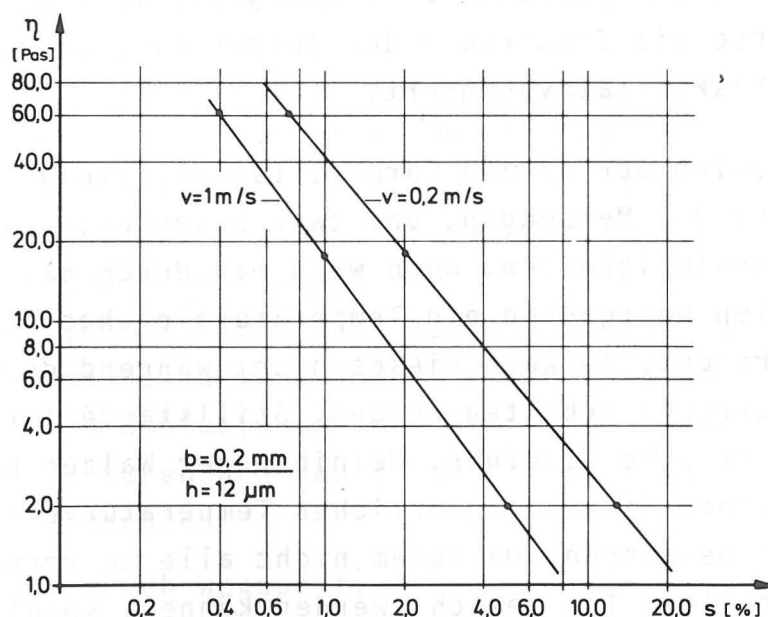


Abb. 41a) Schlupf als Funktion der Viskosität bei newton'schen Ölen, $b=0,2 \text{ mm}$

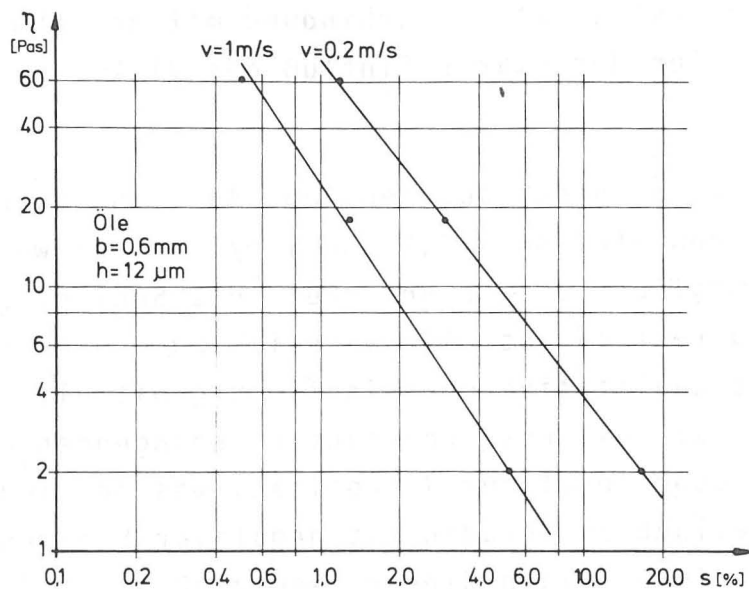


Abb. 41b) Schlupf als Funktion der Viskosität bei newton'schen Ölen, $b=0,6\text{ mm}$

Die starke Beeinflussung der Meßwerte für den Schlupf durch die Viskosität der verwendeten Flüssigkeit verdeutlicht nämlich ebenso die Einwirkung der Temperatur, da diese direkt die Viskosität verändert.

Da beim Abrollen der Walzen Wärme entsteht, steigt die Temperatur während der Messungen, und zwar besonders rasch bei höheren Geschwindigkeiten. Auch wenn man durch ca. einstündiges Abrollen weitgehend ein Temperaturgleichgewicht zu erlangen versucht, so kann dieses nicht während der gesamten Messungen aufrecht erhalten werden. Stillstände für neue Einstellungen, frische Ölzufuhr, Reinigen der Walzen usw. sind Gründe für einen diskontinuierlichen Temperaturverlauf während der Zeit der Messungen. Da zudem nicht alle zu vergleichenden Messungen an einem Tag gemacht werden können, spielen auch noch die unterschiedlichen Umgebungstemperaturen eine Rolle, wodurch das Niveau des jeweiligen Temperaturgleichgewichts beeinflusst wird /39/.

Kurzum, es gelingt selbst bei größter Sorgfalt nicht, immer bei gleichem Temperaturniveau zu messen. Wenn man sich nun aber die starken Veränderungen der Viskosität mit der Temperatur ansieht (Abb. 27 a, b, c), besonders im Meßbereich zwischen 24 und 30° C, so erkennt man sofort, wie problematisch diese Messungen sind.

Nehmen wir als Beispiel ein Ansteigen der Temperatur von 24 auf 27° C während einer Messung mit Öl 30.000. Dann sinkt η von 18 auf 12 Pas, und der Schlupf steigt von 1,0 auf 1,3%, also um 30% auf den Meßwert bezogen.

Je höher die Geschwindigkeit ist, desto schneller erwärmen die Walzen und desto stärker machen sich solche "Meßfehler" infolge nicht konstanter Bedingungen bemerkbar. Auch aus diesem Grund waren die Messungen bei höheren Geschwindigkeiten nicht immer mit der genügenden Zuverlässigkeit durchführbar.

Es ist daher anzunehmen, daß die Meßwerte bei steigenden Geschwindigkeiten für die angegebenen Betriebsbedingungen ($h=12\text{ }\mu\text{m}$; $\eta=\text{konstant}$) etwas zu hoch liegen.

Besonders beim hochviskosen Rupföl erstaunt, daß die letzten Meßwerte für den Schlupf unter dem Schlupf für die trockene Walzenpaarung liegen. In diesem Bereich um $s=1\%$ macht sich auch die Verformung der Gummioberfläche bemerkbar, die in gleicher Größenordnung liegt und mit steigender Geschwindigkeit wächst (vergl. Abb. 33). Es sind also insgesamt drei Einflüsse, die bei dem Öl 30.000 ($\eta=18\text{ Pas}$) und dem Rupföl ($\eta=61\text{ Pas}$) die Schlupfwerte bei steigender Geschwindigkeit nach "oben" drücken und damit Abweichungen von der erwarteten Geraden verursachen.

1. Ölverlust durch Wegspritzen und damit kleiner Schichtdicke
2. höhere Temperatur und damit niedrigere Viskosität
3. wachsende Oberflächenverformung des Gummis, die bei Schlupfwerten bis ca. 4% eine Rolle spielt.

Die Übertragung der Werte in Abb. 41 ist also in diesem Bereich mit gewissen Unsicherheiten behaftet, die die Neigung der Geraden verschieben könnten.

4.8 Messungen mit zusätzlichem Bremsmoment

Um ein bewußtes Gleiten zu erzeugen, wurde ein zusätzliches Bremsmoment an der Achse der Gummiwalze eingeleitet. Dazu wurde eine einfache Anordnung nach Art einer Umfangsbremse bei 180° Umschlingungswinkel gebaut, wie es schematisch in Abb. 42 dargestellt ist. Durch Auflegen unterschiedlicher Gewichte konnte das Bremsmoment von 0 bis 0,15 Nm variiert werden. Feder und Federung wurden vorher geeicht, so daß bei den Messungen durch Ablesen des Federwegs das Moment errechnet werden konnte.

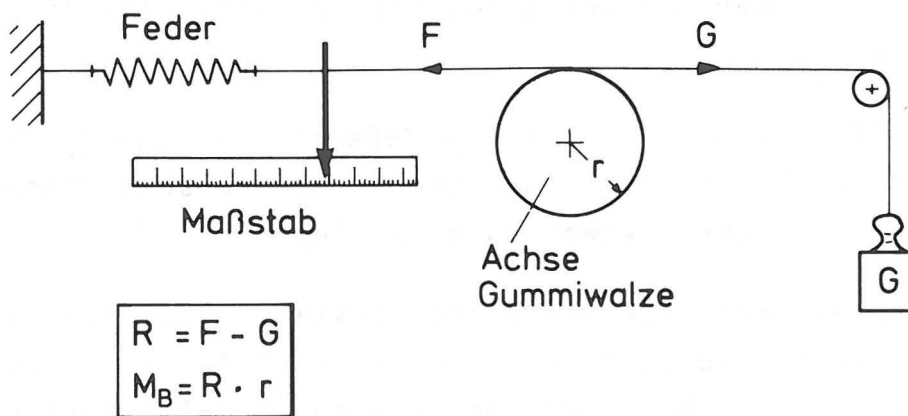


Abb. 42 Skizze der Bremsanordnung

Es wurde bisher festgestellt, daß es drei Formen des Schlupfs gibt, die sich hinsichtlich ihrer Ursachen und ihrer Erscheinungsform unterscheiden, jedoch in ihrer Gesamtheit erfaßt werden. Dies waren:

- der Verformungsschlupf aufgrund der Verformung der Gummioberfläche
- der Verformungsschlupf aufgrund der Verformung der Flüssigkeitsschicht
- und der Gleitschlupf beim Durchrutschen der Walzen.

Jede der genannten Arten des Schlupfes hat seinen charakteristischen Kurvenverlauf. Um zu prüfen, ob sich beim Aufbringen des Bremsmomentes gewisse kennzeichnende Merkmale

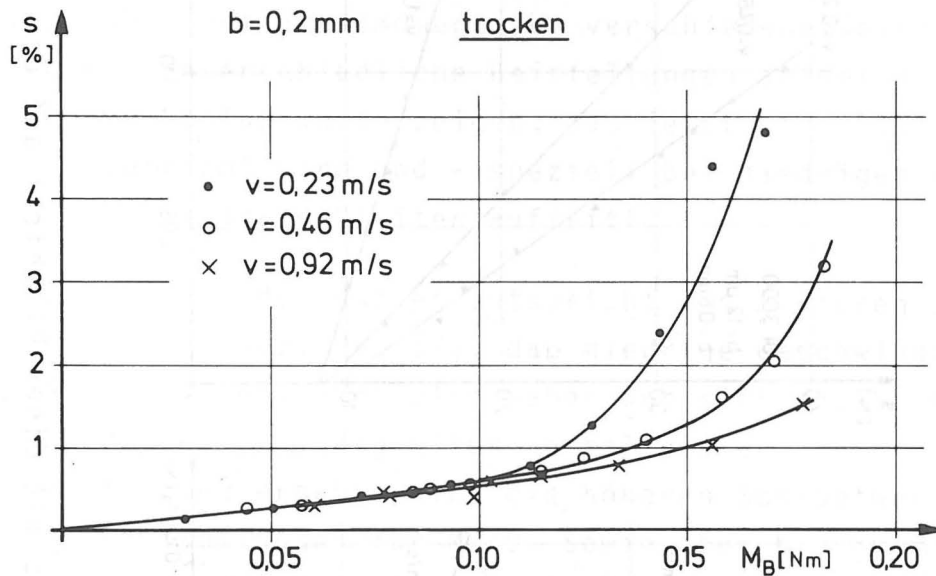


Abb. 43 Schlupf als Funktion des Bremsmoments bei trockenen Walzen

ändern, wurde auch hier zuerst ein Versuch mit trockenen Walzen gefahren. Die Ergebnisse sind in Abb. 43 dargestellt. Trotz der geringen Beistellung von $b = 0,2 \text{ mm}$ kann über den ganzen Meßbereich Haften angenommen werden (relativ niedrige Schlupfwerte bei hohen Tangentialkräften).

Die Kurven verlaufen wie diejenigen ohne Bremsmoment in einem ersten Dehnungsbereich linear und dann nicht-linear ansteigend nach Art einer Potenzfunktion mit Exponenten größer 1. Der Vergleich mit Schlupfkurven in /19/ zeigt, daß diese Verläufe charakteristisch sind für Oberflächendehnungen von Gummi. Diese Dehnungen können nur durch Übertragen der gesamten Umfangskraft auf die Gummiwalze zustande kommen, wofür Haften Voraussetzung ist.

Auch quantitativ findet diese Aussage ihre Bestätigung, da der Schlupf bis zu $M_B = 0,13 \text{ Nm}$ unterhalb 1% bleibt, wie in Abb. 32 bereits gefunden.

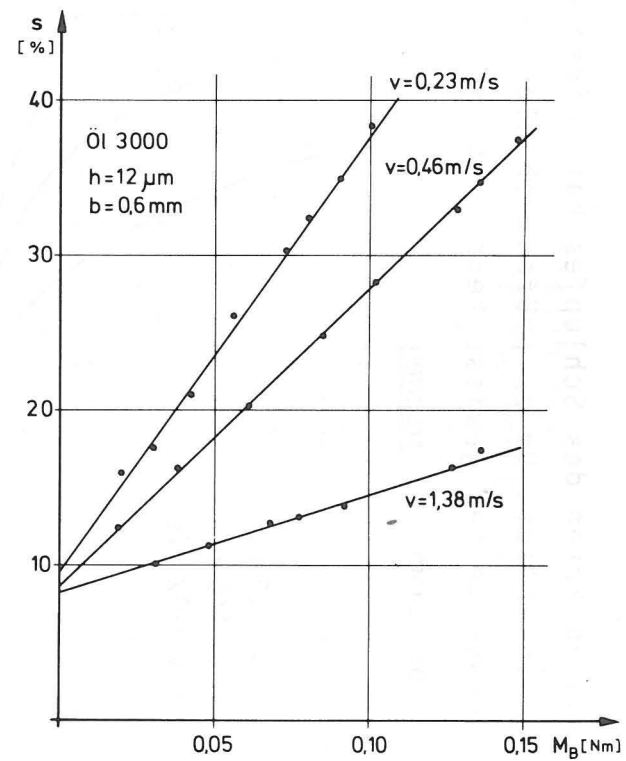
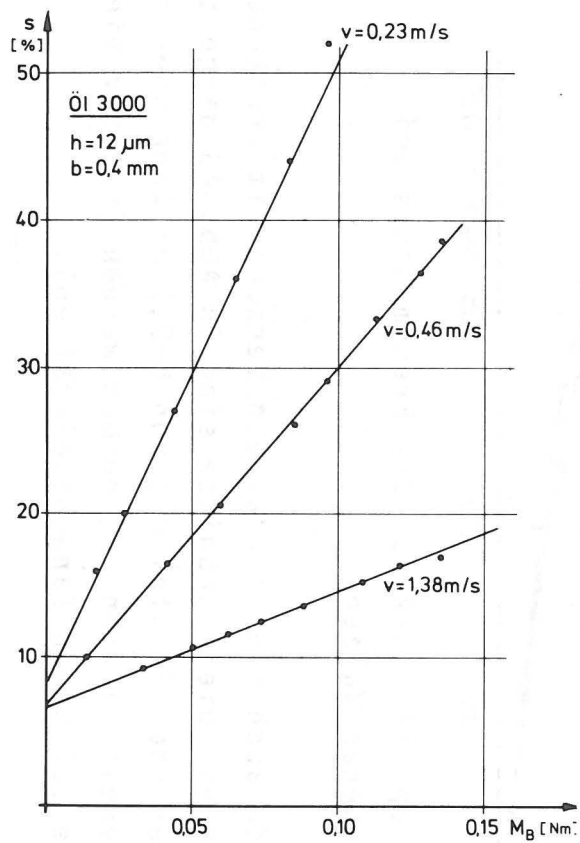
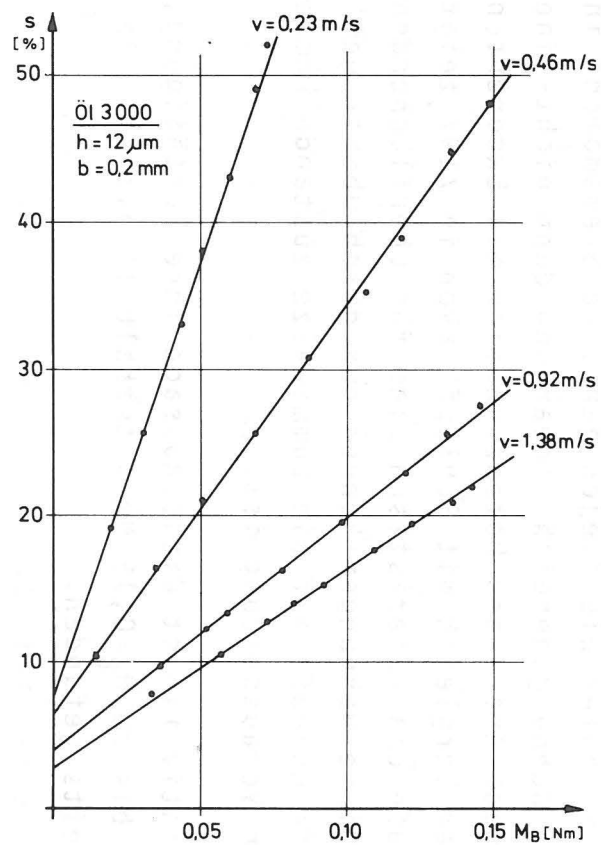


Abb. 44 a, b, c) Schlupf als Funktion des Bremsmoments mit einer Ölschicht auf den Walzen.

Gibt man nun Öl mit einer Schicht von etwa $12\text{ }\mu\text{m}$ auf die Walzen, so ändern sich die Schlupfverhältnisse grundlegend, was aus den Abb. 44 a-c deutlich hervorgeht. Hier ist der Schlupf über dem Bremsmoment für verschiedene Geschwindigkeiten und unterschiedliche Beistellungen aufgetragen. Die sehr hohen Schlupfwerte zeigen, daß jetzt eine Flüssigkeitsschicht verformt wird und - speziell bei niedrigen Geschwindigkeiten - starkes Gleiten auftritt.

Die Reihenfolge der Kurven entspricht den früheren Erkenntnissen (vergl. Abb. 36, 37), daß niedrige Geschwindigkeiten hohe Gleitschlupfe zur Folge haben und sich die Verhältnisse bei höheren Geschwindigkeiten normalisieren. Auch bezüglich der Beistellung ergeben sich die höheren Schlupfwerte bei höheren Beistellungen für $M_B=0$. Sowie aber ein Bremsmoment aufgebracht wird, ändert sich die Reihenfolge. Jetzt ist plötzlich der Schlupf bei niedrigen Beistellungen viel größer als bei hohen. Dieser Sachverhalt ist auch verständlich, da die kleineren Anpreßkräfte bei niedrigen Beistellungen eher Gleiten und Verformen in tangentialer Richtung zulassen als die hohen Anpreßkräfte. Das Bremsmoment bewirkt also im wesentlichen eine stärkere Verformung der Flüssigkeitsschicht und früher eintretendes Gleiten. Die Verformung der Gummioberfläche spielt dabei praktisch keine Rolle.

Ein Blick auf Gl. (25) beweist diesen Sachverhalt zusätzlich. Diese Gleichung gilt nur für Flüssigkeiten. Der Schlupf ist darin - bei sonst konstanten Bedingungen ($b, v, \eta, H=\text{konst.}$) - proportional dem Rollmoment. Die Kurven in den Diagrammen von Abb. 44 sind ohne Ausnahme linear.

4.9 Schlupfmessungen mit Druckfarbe

Nachdem für newton'sche Öle alle direkten Einflußparameter wie Geschwindigkeit v , Schichtdicke h , Viskosität η und Rollmoment M_R in ihrer Auswirkung auf das Rollverhalten untersucht wurden, ist der nächste Schritt, Druckfarbe einzusetzen.

Damit wird einmal der Übergang zur Praxis vollzogen und zum anderen geprüft, ob die anders geartete rheologische Verhaltensweise der Druckfarbe von Bedeutung ist.

Die mit der Druckfarbe B6221 gemessenen Schlupfwerte liegen zwischen 1 und 3% also in einem Bereich, der - wie bei den höher viskosen Ölen - mit dem Schlupf trockener Walzen vergleichbar ist (0,5-1%). Das bedeutet, daß jetzt für die Interpretation die Oberflächenverformung des Gummis mit herangezogen werden muß und nicht allein die Gültigkeit der Gl. (25) für Flüssigkeiten vorausgesetzt werden kann. Es ist daher angebracht, sich den Verlauf des Schlupfs in Abhängigkeit von der Druckkraft anzusehen. Die Druckkraft ist nämlich keine Variable in Gl. (25), wohl aber maßgebend für die Verformung des Gummis und für hydrostatisches Fließen, was bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten noch eine Rolle spielen kann.

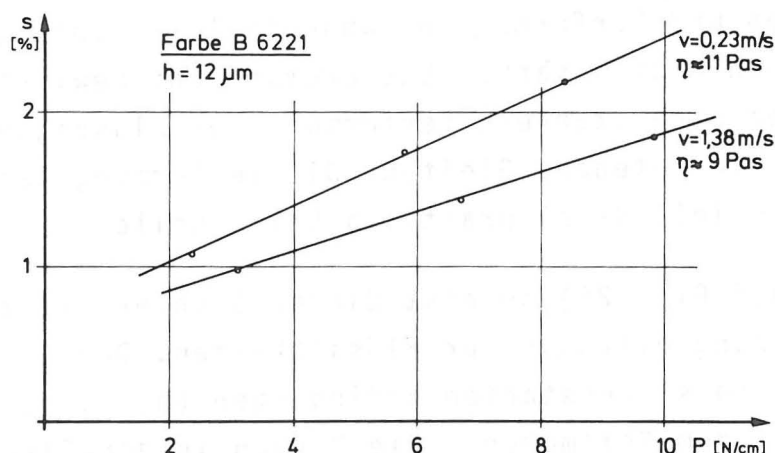


Abb. 45 Schlupf als Funktion der Druckkraft bei eingefärbten Walzen

Aus Abb. 45 geht hervor, daß der Schlupf mit der Druckkraft ansteigt und zwar bei kleiner Geschwindigkeit stärker als bei höherer Geschwindigkeit. Dieser Sachverhalt deckt sich

qualitativ mit dem bei Öl festgestellten (vergl. Abb. 36), nur ist der Anstieg - prozentual auf den Absolutwert des Schlupfs bezogen - bei Druckfarbe wesentlich stärker.

Da die Messungen mit Druckfarbe bei konstanter Beistellung und variabler Geschwindigkeit durchgeführt wurden, standen aus diesen Meßreihen nur 3 Meßwerte zur Verfügung, die jedoch genügen, die Tendenz zu verdeutlichen.

Interessanter und etwas schwieriger zu verstehen sind die Meßreihen, wenn man sie als Funktion der Geschwindigkeit auswertet, wie in den Abb. 46 a, b für die beiden Beistellungen $b=0,2$ und $0,6$ mm geschehen.

Bei den Messungen wurde die Beistellung konstant gehalten und die Geschwindigkeit zuerst von $0,138$ bis auf über 3 m/s gesteigert. Direkt anschließend wurde eine Meßreihe mit abnehmender Geschwindigkeit erstellt. Diese Arbeitsweise hatte zur Folge, daß zwei Kurvenäste entstanden.

Die Erfahrungen bei den Messungen mit Öl legten es nahe, die Temperatur während der Messungen mit Hilfe eines berührungslos arbeitenden IR-Strahlungsthermometers an den Walzenoberflächen zu erfassen. Damit konnte festgestellt werden, daß die Temperatur sehr stark anwächst, wenn die Geschwindigkeit erhöht wird. Die hohe Temperatur bleibt bei der Meßreihe mit abnehmender Geschwindigkeit anfangs auf dem erhöhten Niveau erhalten und fällt anschließend nur geringfügig ab. Der Temperaturverlauf während der Messungen geht aus den Tabellen 1 und 2 hervor. Die Temperatur bei den eingefärbten Walzen steigt auf wesentlich höhere Werte an als bei den mit Öl beschickten Walzen. Dies ist eine Folge der Thixotropie der Druckfarbe (Abb. 28). Durch die innere Reibung wird ein Teil der Verformungsenergie in Wärme umgewandelt, so daß hier nicht nur die Erwärmung infolge viskoelastischer Verluste im Belagmaterial zum Tragen kommt, sondern auch die Wärmeerzeugung in der Druckfarbe selbst.

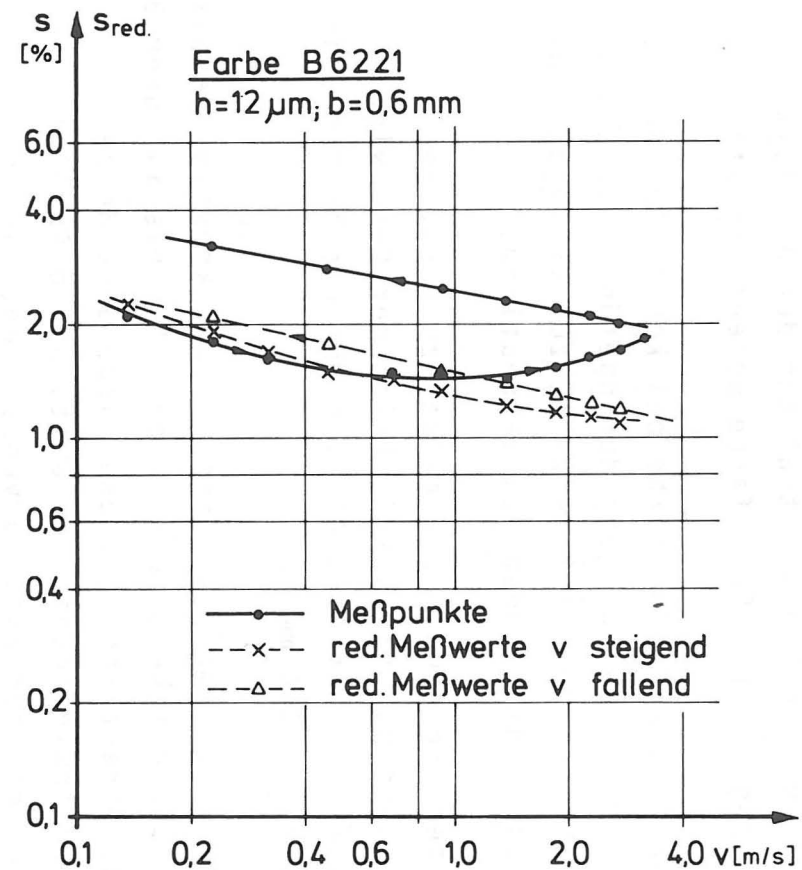
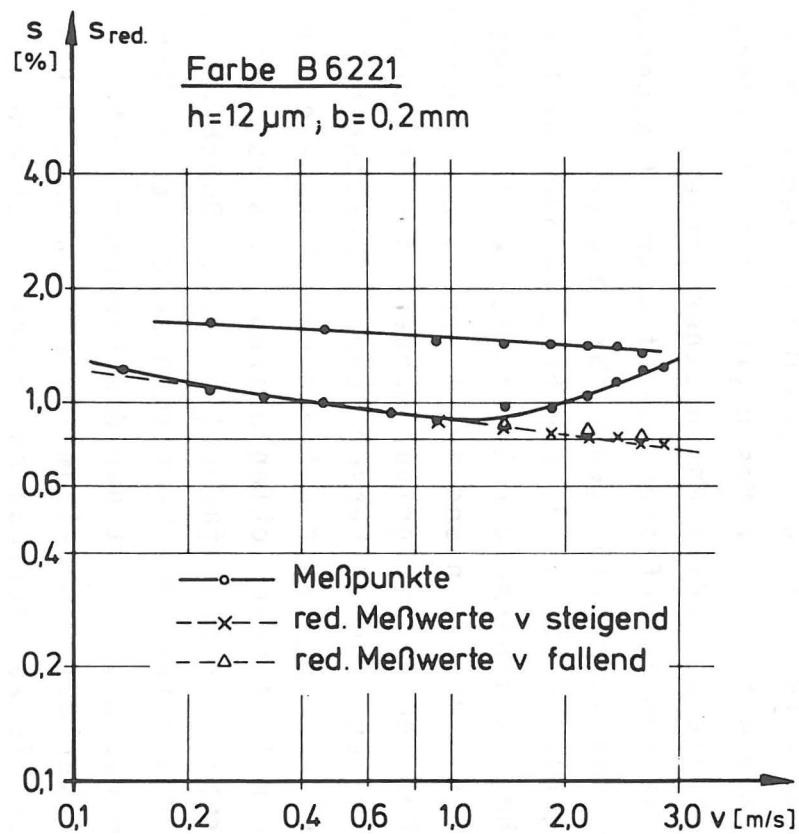


Abb. 46 a, b) Schlupf in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei eingefärbten Walzen

TABELLE 1

Messungen mit Druckfarbe; Beistellung $b=0,2$ mm

v m/s	\vec{s} %	ϑ °C	η_{pl} Pas	s_{red} %	\overleftarrow{s} %	ϑ °C	η_{pl} Pas	s_{red} %
0,138	1,23	23,5	10,7	1,26				
0,238	1,09	24,0	10,4	1,09	1,62	32,5	6,9	1,07
0,32	1,05	24,0	10,4	1,05				
0,46	1,0	24,0	10,4	1,0	1,58	34,5	6,5	0,99
0,69	0,94	24,2	10,4	0,94				
0,92	0,90	24,5	10,1	0,88	1,46	36,0	6,4	0,90
1,38	0,99	26,7	8,9	0,85	1,44	36,5	6,3	0,87
1,84	0,97	27,0	8,7	0,83	1,42	37	6,2	0,84
2,31	1,04	28,7	8,0	0,80	1,43	37	6,2	0,85
2,76	1,16	31,0	7,3	0,81	1,41	37,5	6,1	0,82
3,22	1,22	34,5	6,5	0,77	1,37	37,5	6,1	0,83
3,69	1,25	36	6,4	0,77				

Temperaturverlauf während der Messungen des Schlupfes mit wachsender (\vec{s}) und fallender (\overleftarrow{s}) Geschwindigkeit.

Reduzierung der gemessenen Schlupfwerte auf eine einheitliche Viskosität von 10,4 Pas (s_{red}).

TABELLE 2

Messungen mit Druckfarbe; Beistellung $b=0,6$ mm

v m/s	\vec{s} %	ϑ °C	η_{pl} Pas	s_{red} %	\overleftarrow{s} %	ϑ °C	η_{pl} Pas	s_{red} %
0,138	2,1	23	11,1	2,25				
0,23	1,8	23	11,1	1,92	3,2	33	6,8	2,09
0,32	1,63	23,5	10,8	1,69				
0,46	1,5	23,8	10,5	1,51	2,8	34,4	6,6	1,77
0,69	1,5	24,5	10,1	1,45				
0,92	1,5	25,7	9,4	1,34	2,45	36,0	6,4	1,51
1,38	1,43	26,5	9,0	1,23	2,3	36,5	6,3	1,39
1,85	1,53	28,5	8,1	1,19	2,2	37	6,2	1,31
2,3	1,66	31,0	7,3	1,15	2,1	37	6,2	1,25
2,76	1,71	32,5	6,9	1,12	2,0	37	6,2	1,19
3,2	1,84	34,5	6,5	1,15				

Temperaturverlauf während der Messungen des Schlupfes mit wachsender (\vec{s}) und fallender (\overleftarrow{s}) Geschwindigkeit; Druckkraftniveau bei fallender Geschwindigkeit ca. 0,8-1 N/cm höher als bei ansteigender Geschwindigkeit.

Reduzierung der gemessenen Schlupfwerte auf eine einheitliche Viskosität von 10,4 Pas (s_{red}).

Mit der steigenden Temperatur sinkt die Viskosität der Druckfarbe bis auf 60% ihres ursprünglichen Wertes. Diese Viskositätsänderung muß entsprechend den Überlegungen aus Kap. 4.7.2 und Abb. 41 Folgen auf den Schlupf haben.

Es wurde daher versucht, eine synthetische Kurve zu erzeugen, bei der die Schlupfwerte alle auf eine Temperatur und damit eine Viskosität bezogen waren. Da der Schlupf nach Gl. (25) umgekehrt proportional zur Viskosität verläuft, ließen sich die reduzierten Schlupfwerte einfach ermitteln.

$$S_{\text{red}} = S \frac{\eta}{\eta_0}$$

Die η -Werte für die gemessenen Temperaturen wurden Abb. 29 entnommen, in der die Temperaturabhängigkeit der plastischen Viskosität aufgetragen ist. Diese Normierung wurde für die gerade herrschende Umgebungstemperatur von 24° und $\eta_0 = 10,4$ Pas durchgeführt. Die so errechneten Werte sind ebenfalls in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt und in den Abb. 46 eingetragen. Es ergeben sich jetzt einheitliche Kurven, die mit guter Genauigkeit als linear angesehen werden können. In Abb. 46 b liegt die reduzierte Kurve für die Meßreihe mit fallender Geschwindigkeit zwar etwas höher. Der Grund dafür ist aber das höhere Druckkraftniveau bei dieser Messung und mit der Druckkraft steigt auch der Schlupf. Linearität und Steigung sind gleich. Bei $b = 0,2$ mm (Abb. 46a) hingegen ist das Druckkraftniveau bei auf- und absteigendem Kurvenast praktisch gleich. Die reduzierten Kurven fallen daher auch gut aufeinander.

Der auf diese Weise gewonnene Verlauf der Schlupfkurven dürfte ein Beweis für die Richtigkeit der bisherigen Überlegungen sein und auf die innere Logik zwischen den Messungen hinweisen. Der Schlupf fällt mit der Geschwindigkeit, wie es auch bei den Ölen festgestellt wurde.

Bei den höheren Geschwindigkeiten verringern sich die Durchgangszeiten durch die Druckzone. Die Zeit für eine

Krafteinwirkung verringert sich ebenso. Die Belastungen werden stoßähnlich.

Dem durch den Anpreßdruck verursachten hydrostatischen Druck bleibt weniger Einwirkzeit auf das Flüssigkeitselement. Das dabei beobachtbare Fließen entfällt damit.

Die kurzzeitigen stoßähnlichen Beanspruchungen - auch in tangentialer Richtung - verursachen bei jedem viskoelastischen Material eine härtere Reaktion durch den höheren komplexen E-Modul.

Auch dadurch verformt sich das Flüssigkeitselement bei einem schnellen Durchgang durch die Druckzone weniger als bei einem länger dauernden. Geringere Verformung aber heißt kleinerer Schlupf. Die Flüssigkeit verhält sich ähnlich wie ein Festkörper und wird durch den Spalt transportiert.

Je höher die Geschwindigkeit und die Zähigkeit ist, desto weniger herrscht Gleiten, sowohl bei Öl als auch bei Farbe und desto ähnlicher sind auch die physikalischen Vorgänge im Walzenspalt.

Es liegt daher nahe, den direkten Vergleich zwischen beiden Messungen bezüglich der Viskosität zu wagen.

Die Druckfarbe hat eine nicht-lineare Fließkurve (vergl. Rheogramm Abb. 28) und dazu noch Hysterese-Eigenschaften infolge des besonderen Strukturaufbaus. Das bedeutet, daß die Druckfarbe an jeder Stelle der Fließkurve eine andere Viskosität - die sog. scheinbare Viskosität - aufweist. Je nach Vorgeschichte können zu einer Wertepaarung Schergefälle/ Schubspannung unterschiedliche Viskositäten gehören. Unter Vorgeschichte sollen zeitlich vorangegangene Deformationen verstanden werden, in denen die Struktur abgebaut wird oder auch Relaxationsphasen, in denen sich die Struktur wieder aufbauen kann.

Das Problem liegt nun darin herauszufinden, welche Viskosität bei den Verformungs-/Spannungsmechanismen im Walzenspalt gilt oder wirksam wird. Da der Schlupf in Flüssigkeiten mit der Viskosität verknüpft ist und die Öle die einfacher zu kennzeichnenden Flüssigkeiten sind, wurde versucht, zugehörige Meßwerte aus den Messungen mit Farbe in die Diagramme $s=f(\eta)$ für Öle einzutragen (Abb. 41 a, b). Für die Druckfarbe wurde dabei als erste Näherung die plastische Viskosität verwendet.

Ein solcher Vergleich ist nur dann sinnvoll durchzuführen, wenn alle anderen Einflußgrößen bei den Messungen mit Öl und den Messungen mit Farbe die gleichen sind. D.h. also Druckkraft, Schichtdicke und Verlustmomente müssen bei beiden Messungen gleich sein, damit die Schlupfursachen die gleichen sind. Besonders die Schichtdicke muß genügend groß sein, damit physikalisch gleiche Vorgänge stattfinden und als Grundlage Gl. (25) eingesetzt werden kann.

In den Abb. 47 a, b sind die Meßpunkte für Druckfarbe in die Diagramme für Öle aus Abb. 41 eingetragen. Sie liegen unterhalb der zugehörigen Geraden $s=f(\eta)$, die eine Gesetzmäßigkeit nach Gl. (25) repräsentieren. Geht man nun von der Erkenntnis aus, daß die verwendete plastische Viskosität nicht die "echte", im Walzenspalt wirksame Viskosität ist, so findet man diese jedoch, indem man die Meßpunkte für Farbe bei gleichem Schlupf auf die Geraden projiziert. Die wirksame Viskosität für die unter den vorgegebenen Betriebsbedingungen herrschenden Vorgänge im Walzenspalt kann man dann auf der η -Achse ablesen. Diese Viskosität ist immer größer als die im Viskosimeter feststellbare plastische Viskosität.

Die mit den newton'schen Ölen bei jeweils bekannter, konstanter Viskosität erstellten Geraden können daher als eine Art von Eichgeraden betrachtet werden, die es ermöglichen, in einem "Maschinenviskosimeter" von der Bauart eines Zweiwalzenstuhls die unbekannte wirksame Viskosität einer Druckfarbe zu bestimmen.

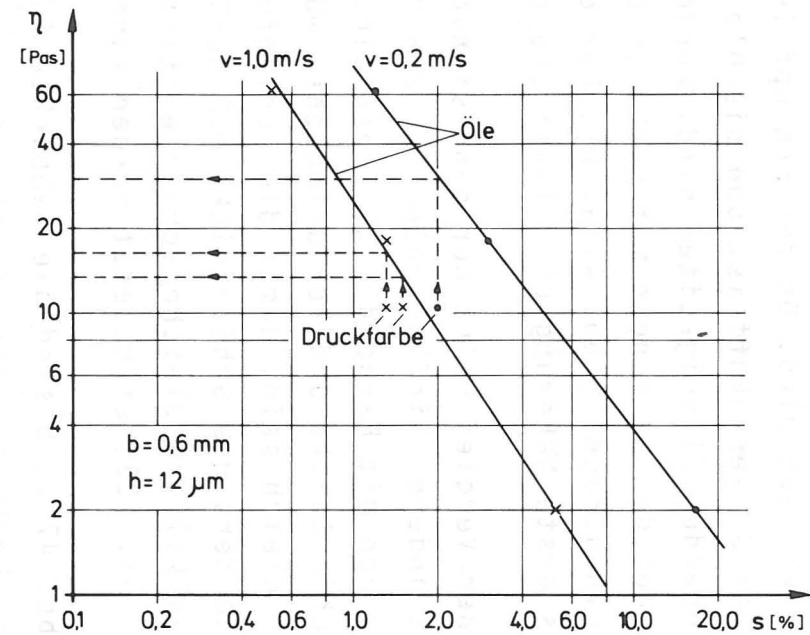
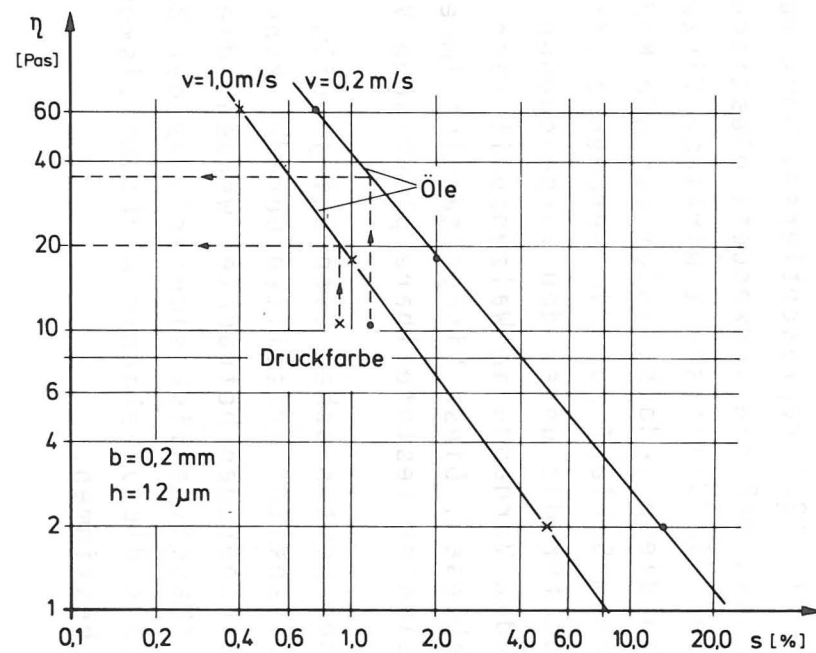


Abb. 47a, b Schlupf in Abhängigkeit von der Viskosität
Ermittlung einer wirksamen Viskosität für Druckfarben

Bei niedrigen Verarbeitungsgeschwindigkeiten liegen diese Viskositäten höher als bei hohen, entsprechend der in Viskosimetern feststellbaren Tatsache, daß bei höherem Schergefälle die Viskosität sinkt.

Die aus Abb. 47 abzulesenden Zahlenwerte für die Druckfarbenviskosität sollten hier weniger zur Diskussion stehen als das Verfahren selbst.

Es ist meßtechnisch außerordentlich schwierig, an einem Versuchsstand mit vielen variablen Einstellmöglichkeiten bei mehreren ganz unterschiedlichen und zeitlich weit auseinander liegenden Messungen genau gleiche Bedingungen zu erzielen.

So liegen die Druckkräfte bei den Messungen mit Öl noch recht gut gleich, für die Druckfarbe jedoch liegen sie etwas höher (ca. 0,4 bis 1 N/cm).

Dazu kommt, daß der Schlupf eine sehr empfindliche Meßgröße ist, die nur mit entsprechenden Streubreiten ermittelt werden kann. Ob bei gleich eingestellten Meßbedingungen ein Schlupf von 1,3 oder 1,5% oder von 0,52 bzw. 0,58% wie bei Rupföl gemessen wird, ist sicher im Rahmen der Meßmöglichkeiten.

Die Steigung der Eichgeraden kann jedoch dadurch beträchtlich verändert werden und somit die abzulesende wirksame Viskosität der Druckfarbe.

Wichtig erscheint hier, daß es ein neues Verfahren, gegründet auf neuen Überlegungen gibt, mit dem es möglich ist, die im Walzenspalt wirkende Viskosität einer Druckfarbe zu ermitteln bzw. sich wenigstens Vorstellungen von deren Größenordnung zu verschaffen.

Ein allein auf diesen Zweck hin konstruiertes Gerät erlaubt es mit Sicherheit, die notwendigen Meßvorgänge konstanter und vor allem reproduzierbarer einzurichten, als eine äußerst variable Meßapparatur mit ihren vielen Einstellmöglichkeiten und den damit verbundenen mechanischen Toleranzen.

Der große Vorteil liegt darin, daß unter genau den gleichen Bedingungen wie sie in einem Walzenfarbwerk in der Praxismaschine herrschen, eine Viskositätsmessung möglich ist. Der Gedanke, eine Schlupfmessung zur Viskositätsbestimmung zu benutzen, ist absolut neu.

4.10 Der Einfluß der Schichtdicke bei Messungen mit Druckfarbe

Die Aufgabe eines Walzenfarbwerks ist die Erzeugung einer dünnen Farbschicht von hoher Gleichmäßigkeit. Innerhalb des Walzenzuges eines Farbwerks heutiger Bauart variiert die Schicht zwischen 2 und 30 (50) μm . Sie ist die eigentliche Verarbeitungsgröße, auf deren Einfluß trotz der bisherigen Untersuchungen mit Öl speziell für Druckfarbe noch eingegangen werden sollte.

Die Farbschicht h auf jeder Walze ist maßgebend für die Spalthöhe H zwischen Gummi- und Stahlwalze. Für das weiche Belagmaterial von Farbwerkswalzen kann man von einem über die Druckzone praktisch gleich hohen Spalt ausgehen. Das bedeutet aber, daß die Farbschicht ähnlich einem Stück Folie durch den Spalt gefördert wird und somit ab einer gewissen Dicke wie eine geringfügig erhöhte Beistellung wirkt.

Bei den dünnen Farbschichten (bis ca. 5 μm) überspielt die Oberflächenrauigkeit der Gummiwalze diese Wirkung. Wie die Aufnahmen im ersten Teil dieser Arbeit zeigen, dringen jedoch auch die Rauigkeitsspitzen bei rotierenden Walzen nie ganz durch den Film hindurch. Es bleibt immer eine Schicht zwischen ihnen und der Stahlwalzenoberfläche. Sollten elasto-hydrodynamische Vorgänge im Spalt auftreten, so besteht über die Integration der Reynolds'schen Gleichung bei den geeigneten Randbedingungen immer eine Beziehung zwischen der Spalthöhe, dem Druckgefälle und der Fließgeschwindigkeit. Diese Beziehung ist auch in einfachen Fällen nicht-linear /50/.

Untersuchungen bei Variation der Schichtdicke können also einen Hinweis geben auf die theoretischen Ansätze und somit auf die physikalischen Vorgänge im Spalt.

Die Druckkraft ist auch hier wieder eine aussagekräftige und mit ausreichender Zuverlässigkeit zu messende Größe. Es wurden daher Versuche gefahren, bei denen Drehgeschwindigkeit und Beistellung in einer Meßreihe konstant gehalten wurden und die Schichtdicke durch Farbzufuhr verändert wurde. Registriert wurde vor allem Druckkraft und Schlupf. Die Farbschicht wurde mit der Meßeinrichtung aus Kap. 2.3 im Durchlicht an der Glaswalze erfaßt.

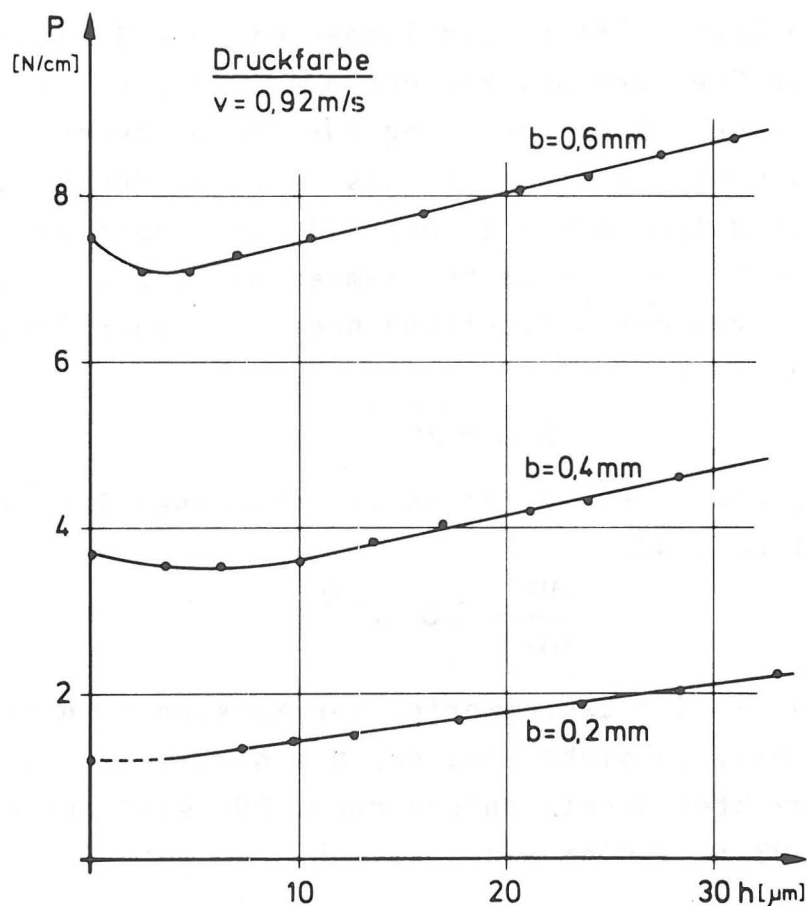


Abb. 48 Druckkraft in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Druckfarben

In Abb. 48 ist die gemessene Druckkraft für verschiedene Beistellungen bei einer Geschwindigkeit von 0,92 m/s aufgetragen. Bei kleineren Schichten sinkt die Druckkraft zuerst geringfügig unter die Kräfte bei trockener Walzenpaarung ($h=0$). Diese Feststellung deckt sich soweit mit den Messungen von GLÜCK /19/, der lediglich mit kleinen Schichten gemessen hat. Die Ursache für das Absinken der Gesamtkraft liegt vor allem in dem Farbzug in der Auslaufzone der Walzen begründet. Außerdem hebt die Flüssigkeit zwischen den Walzen die durch die viskoelastischen Eigenschaften verursachte Asymmetrie der Druckverteilung auf /50 S. 164/ und ändert damit den Verformungszustand des Belagmaterials.

Mit zunehmender Schichtdicke aber wird der Einfluß des Farbzugs durch einen anderen Einfluß kompensiert und übertroffen. Die Druckkraft steigt linear mit der Schichtdicke an, wobei die Steigung bei kleineren Anstellungen geringer ist als bei hohen. Eine Erklärung für dieses Verhalten bietet sich, wenn man die Kraft als Funktion der Beistellung bei trockenen Walzen ansieht (Abb. 30) und dabei die Farbschicht als ein Stück Folie bestimmter Dicke betrachtet. Die Kraft ist von der Beistellung nach Art einer Potenzfunktion abhängig:

$$P \sim b^{1,6} \quad (26)$$

Die Steigung dieser Kurve ist an verschiedenen Stellen b unterschiedlich groß:

$$\frac{dP}{db} \sim 1,6 \cdot b^{0,6} \quad (26a)$$

Geht man nun mit den Zahlenwerten der Messungen in diese Gleichungen ein, so sieht man, daß die gemessenen Toleranzen dem oben gemachten Ansatz entsprechen. Für eine Schichtdicke von $30 \mu\text{m}=0,03 \text{ mm}$ ergibt sich nämlich:

TABELLE 3

b (mm)	P~	dP/db ~
0,2	0,076	0,609
0,23	0,095	0,663
0,6	0,442	1,178
0,63	0,478	1,213

Aus dieser Tabelle geht einmal hervor, daß bei einer Erhöhung der Beistellung - hier durch die wachsende Schichtdicke herbeigeführt - die Druckkraft selbst bei diesen kleinen Werten merklich ansteigt. Die Krümmung der $P=f(b)$ -Kurve ist bei der starken Spreizung der Skala nicht sichtbar. Zwischen den Punkten $b=0,2$ und $0,23$ bzw. $0,6$ und $0,63$ kann die Kurve linearisiert werden.

Zum zweiten wird deutlich, daß die Steigung der $P=f(b)$ -Kurve bei niedrigen Anstellungen kleiner als bei höheren Anstellungen ist. Der linearisierte Abschnitt steigt bei $b=0,6$ mm stärker als bei $0,2$ mm an, genau wie es die Messungen zeigen.

Wären hingegen elasto-hydrodynamische Vorgänge für den Druckkraftanstieg verantwortlich, so müßten die Kurven stark gekrümmt verlaufen (ähnlich h^3 , mit h jedoch im μm -Bereich).

Die Veränderungen des Schlupfs mit der Schichtdicke sind in Abb. 49 wiedergegeben. Auch hier ergeben sich erstaunlich gute Geraden, wenn man die Schwierigkeiten und Fehlermöglichkeiten bei Schichtdickenmessungen im μm -Bereich auf rotierenden Walzen und von Schlupfmessungen in Bruchteilen von Prozentpunkten bedenkt.

Aus den Messungen mit Ölen resultierte ebenfalls eine lineare Abhängigkeit des Schlupfes von der Schichtdicke, wenn auch in einem anderen Zahlenwertbereich.

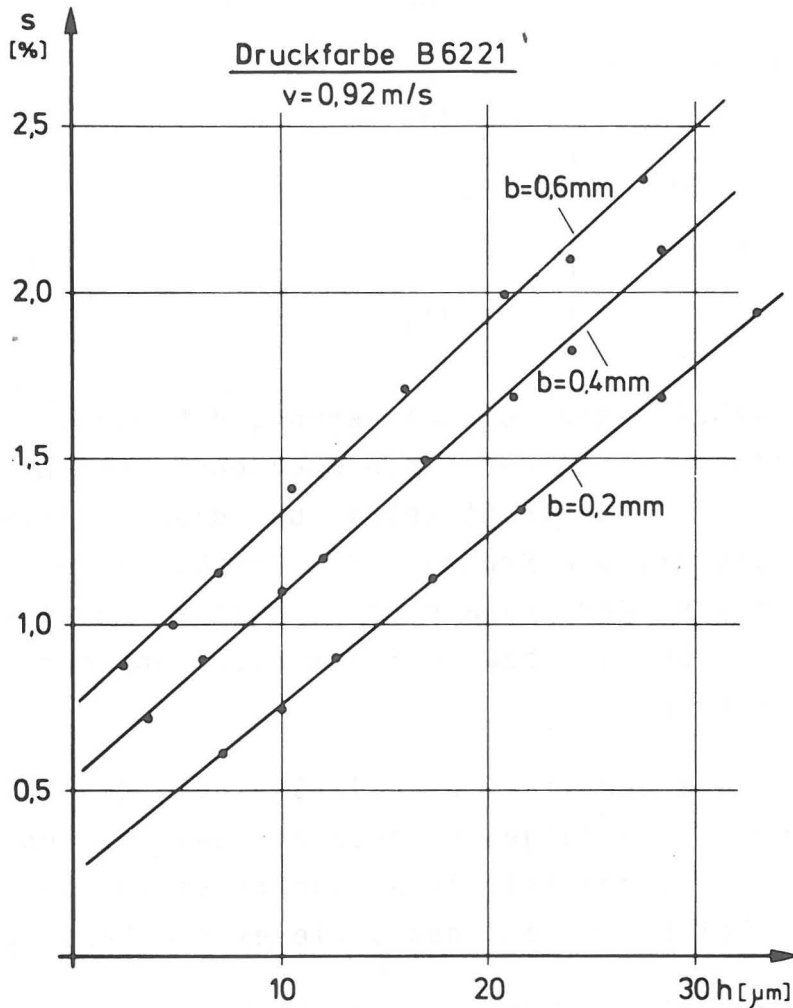


Abb. 49 Schlupf in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Druckfarbe

Bei gleichen äußeren Betriebsbedingungen (b , $v = \text{konst.}$) sind die für die Materialdehnung und damit den Schlupf verantwortlichen Kräfte auch gleich. Die zu übertragende Tangentialkraft wirkt also einmal auf die dünnere, dann auf die dickere Schicht. Wegen der kurzen Einwirkzeit ergibt sich ein festkörperähnliches Verhalten und die Schicht verformt

sich um einen bestimmten Winkel, der aus den Elastizitätseigenschaften des Materials resultiert ($\gamma = \tau/G$), nicht aber von der Schicht abhängt.

Bei größeren Schichten ist bei gleichem Winkel die Verformungsstrecke größer als bei kleinen Schichten. Diese Verformung addiert sich zu der Dehnung der Gummioberfläche ($h=0$). Die Vergrößerung der Verformungsstrecke ist der zunehmenden Schichtdicke direkt proportional (Abb.50).

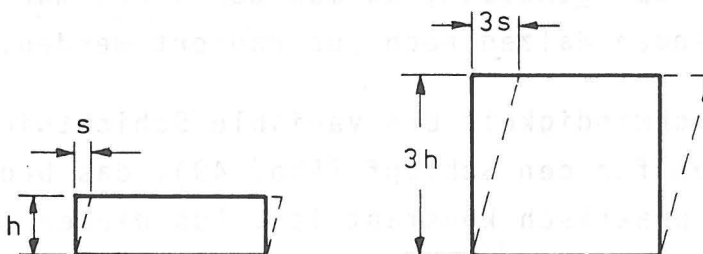


Abb. 50 Verformung der Schicht

Bei mit dem Anpreßdruck gleichbleibenden Materialeigenschaften der Druckfarbe ($G = \text{konst.}$) müßten die Geraden in Abb. 49 sogar parallel verlaufen. Es ist aber bekannt, daß bei Flüssigkeiten die Viskosität und damit auch der Schubmodul mit steigendem Druck ansteigt /vergl. 50 S. 136/. Folgerichtig ist die Gerade für $b=0,6 \text{ mm}$ auch steiler als die für $b=0,2 \text{ mm}$ (etwa sechsfache Druckerhöhung).

Zahlenmäßig ist festzuhalten, daß der Schlupf mit Druckfarbe im Bereich von im Farbwerk vorkommenden Schichten den Verformungsschlupf trockener Walzen um max. 1,5% übersteigt. Bei Verwendung von niedrig-viskosem Öl hingegen werden ganz andere Größenordnungen des Schlupfes erreicht (bis 12%). Es darf daraus geschlossen werden, daß bei Vorhandensein von Druckfarbe wie bei trockenen Walzen ein reiner Verformungsschlupf auftritt.

Bei niedrig viskosem Öl, hingegen kann Gleiten nicht ganz ausgeschlossen werden, obwohl die niedrigeren Materialwerte auch zu höheren Verformungswinkeln führen.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse und die dazu dargelegten Gleichungen ermöglichen es auch, die Größenordnung der im Walzenspalt auftretenden Schergefälle direkt zahlenmäßig anzugeben. Mit Hilfe der Gleichungen auf S. 87 und 101 stellt sich der Zusammenhang zwischen Schlupf und Schergefälle wie folgt dar:

$$s \text{ bzw. } \Delta s = \dot{\gamma} \cdot H/v$$

Dabei ist s der reine Schlupf in der Flüssigkeitsschicht. Ist der Gesamtschlupf gemessen, so muß der Verformungsschlupf der trocken laufenden Walzen noch subtrahiert werden.

Für konstante Geschwindigkeit und variable Schichtdicken ergaben sich Geraden für den Schlupf (Abb. 49), das bedeutet, daß $\dot{\gamma}$ pro Gerade praktisch konstant ist. Aus diesen Geraden lassen sich z. B. folgende Zahlenwerte für das Schergefälle errechnen:

$b = 0,2 \text{ mm}$	$\dot{\gamma} = 230 \text{ s}^{-1}$
$b = 0,4 \text{ mm}$	$\dot{\gamma} = 256 \text{ s}^{-1}$
$b = 0,6 \text{ mm}$	$\dot{\gamma} = 265 \text{ s}^{-1}$

Diese Werte liegen naturgemäß über dem bei stehenden Walzen ermittelten Schergefälle von ca. 1 s^{-1} (Fließen allein durch den statischen Druck). Auf keinen Fall aber entstehen Schergefälle bis 10^6 s^{-1} , wie sie teilweise in der Literatur genannt werden.

5. Z U S A M M E N F A S S U N G

Für die Untersuchungen des Problemkreises "Farbe im Walzenspalt" wurde als Farbwerksmodell ein Zweiwalzenstuhl mit verkleinerten Abmessungen gebaut. Kern dieses Zweiwalzenstuhls war als starre Walze eine angetriebene Glaswalze montiert, die über Friktion eine Gummiwalze antreiben konnte. Zusätzlich war eine Farbflußeinrichtung (Mit Farbzufuhr und Farbabfuhr) angebaut, die einen Farbtransport von immer frischer Farbe durch die eigentliche Versuchseinheit ermöglichte.

Der Versuchsstand wurde mit elektro-mechanischen und optischen Meßwertgebern für folgende Meßgrößen ausgerüstet: Beistellung, Druckkraft, Tangentialkraft, Bremsmoment, Drehzahl, Drehzahlverhältnis und Schichtdicke. Jede Meßgröße wurde über eine geeignete Auswerteelektronik entweder digital oder analog angezeigt bzw. direkt über den Drucker eines Prozeßrechners ausgedruckt.

Im Vorderfeld der eigentlichen meßtechnischen Untersuchungen wurden Photoanalysen der Vorgänge im Spalt durchgeführt. Die daraus durch direkte Sinneswahrnehmung gewonnenen Erkenntnisse unterstützen das Vorstellungsvermögen und erleichtern die Interpretation abstrakter Meßergebnisse außerordentlich.

Die photoanalytischen Untersuchungen ergaben, daß sich die Walzenoberflächen auch bei kleinen Schichtdicken nicht direkt berühren, sondern immer ein Flüssigkeitsfilm dazwischen ist. Ein hydrostatisches Fließen und dadurch verursachte hohe Schergefälle konnten nicht festgestellt werden.

Bei der meßtechnischen Erforschung des Rollverhaltens wurden vor allem Druckkraft und Schlupf als resultierende Größen der ursächlichen Variablen Beistellung, Drehzahl, Viskosität, Schichtdicke und Bremsmoment erfaßt und ausgewertet.

Systematisch vorgehend wurden die Verhältnisse bei trockenen Walzen, bei mit Ölen beschickten Walzen und bei eingefärbten Walzen untersucht. Aus dem einfachen newton'schen Ansatz heraus konnten Beziehungen zwischen dem Schlupf und den oben genannten Variablen hergeleitet werden, die die Meßergebnisse immer dann qualitativ gut bestätigten, wenn die wesentlichen Vorgänge in der Flüssigkeitsschicht stattfanden.

Abhängigkeiten von der Druckkraft zeigten jedoch immer einen festkörperähnlichen Verformungsmechanismus an. Insbesondere bei Druckfarbe und den höher viskosen Ölen muß von einem Deformationsverhalten wie bei einer weichen Zwischenschicht ausgegangen werden. Strömungsvorgänge sind nicht feststellbar.

Durch direkten Vergleich mit den Messungen mit Ölen ist es gelungen, ein Verfahren vorzuschlagen, das es ermöglicht, die im Spalt wirksame Viskosität einer Druckfarbe aus Schlupfmessungen zu bestimmen. Diese Viskosität liegt immer über den aus Viskosimetermessungen angegebenen Viskositäten.

Es kann daraus der Vorschlag für ein direkt den Praxisbedingungen angepaßtes "Maschinenviskosimeter" gemacht werden.

Der Zusammenhang zwischen Schlupf und Schergefälle wurde gleichungsmäßig nachgewiesen. Daher sind aus den Schlupfmessungen auch die Schergefälle zu ermitteln. Als Größenordnung für die Schergefälle, die im mit Druckfarbe gefüllten Spalt von Gummi- und Stahlwalze auftreten, wurden $\text{ca. } 250 \text{ s}^{-1}$ errechnet.

6. L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- /1/ STIEHLER, H., "Die Viskosität der Druckfarben",
Papier und Druck (Druck und Reproduktion) 8,
28-32 (1959)
- /2/ BANKS, W.H., "An Outline of Rheology in Printing",
Rheologica Acta 4, 272-275 (1965)
- /3/ MILL, C.C., "The behaviour of liquids on rotating
rollers", JOCCA 50, 396-406 (1967)
- /4/ MEWIS, J., "Applications de rhéométrie oscillatoire",
FATIEPEC-Kongreß 1968, Sect. 3, S. 120
- /5/ HELLINCKX, L. und MEWIS, J., "Rheological behaviour
of pigment dispersions as related to roller passage",
Rheologica Acta 8, 519-525 (1969)
- /6/ SCHURZ, J., "Rheologische Charakterisierung von
Pasten und Farben", Wochenblatt für Papierfabrikation
98, 503-508 (1970)
- /7/ VOET, A., "Ink and Paper in the Printing Process",
Chapt. V u. VI (Interscience Publisher, New York-
London, 1952)
- /8/ WIRZ, B., "Die wissenschaftlichen Grundlagen des
Flachdruckverfahrens, Teil II", Druck-Print 109,
719-726 (1972)
- /9/ HELBIG, T., "Der Mechanismus der Farbübertragung von
der Druckform auf den Bedruckstoff", Papier und Druck
(Druck und Reproduktion) 26, 81-84 (1977)
- /10/ HOPF, L., "Abhandlungen über die hydrodynamische
Theorie der Schmiermittelreibung von N. PETROW,
O. REYNOLDS, A. SOMMERFELD und A.G.M. MICHELL",
Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 218
(Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1927)
- /11/ DOWSON, D. und HIGGINSON, G.R., "Elasto-hydrodynamic
Lubrication" Chapt. 2 u. 3, (Pergamon Press, Oxford,
1966)
- /12/ MILL, C.C., "The Behaviour of Printing Ink on Rollers",
JOCCA 44, 596-617 (1961)
- /13/ BANKS, W.H. und MILL, C.C., "Some observations on the
behaviour of liquids between rotating rollers",
Proc. Roy. Soc. A 223, 414-419 (1954)

- /14/ TANNER, R.I., "Full Film Lubrication Theory for a Maxwell Liquid", Int. J. Mech. Sci. 1, 206-215 (1960)
- /15/ MITCHELL, D., "Rolling Contact Lubrication using a Maxwell Fluid", J. Mech. Engng. Sci. 12, 235-237 (1970)
- /16/ DECKER, P., "Theoretische Überlegungen zum Verhalten von Druckfarben im Spalt zweier Walzen", Druck-Print 110, 755-765 (1973)
- /17/ DECKER, P., "Beitrag zur Analyse des Offsetprozesses", Dissertation TU München 1974
- /18/ EHRMANN, G., TAKSERMAN-KROZER, R. und SCHENKEL, G., "Non-Newtonian fluid flow between rotating cylinders", Rheologica Acta 16, 240-247 (1977)
- /19/ GLÜCK, M., "Untersuchung des Rollverhaltens von Mehrwalzen-Systemen unter Einbeziehung einer viskoelastischen Walze", Dissertation TH Darmstadt 1976
- /20/ RECH, H., "Beiträge zur experimentellen und rechnerischen Untersuchung des Farbtransportes in Walzenfarbwerken von Druckmaschinen", Dissertation TH Darmstadt 1971
- /21/ SPILLER, E., FEDER, R. und TOPALIAN, J., "X-Ray Lithography and X-Ray Microscopy", Phys. Bl. 32, 564-571 (1976)
- /22/ Bericht "Technische Beiräte tagten" in Fogra-Mitteilungen Nr. 90, S. 12-13 (1976)
- /23/ PFEIFFER, G., "Beitrag zum Problem der Rollvorgänge in Druckmaschinen unter besonderer Berücksichtigung der visko-elastischen Eigenschaften von Walzenbelägen", Dissertation TH Darmstadt 1970
- /24/ GLADUN, B. und FÖRSTER, U.-H., "Aufnehmer zur Komponentenerlegung ebener Kraftvektoren", messen steuern regeln 13, 110-113 (1970)
- /25/ GLÜCK, M., "Rollprobleme an Mehrwalzensystemen unter Einbeziehung einer viskoelastischen Walze", Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V., Heft 2/1972 S. 5-55
- /26/ NIESER, G., "Verbesserte Zügigkeitsmessung an Druckfarben I", Polygraph 28, 500 u. 502 (1975)
- /27/ WIRZ, B., "Beiträge zum Problem der Auslegung von Farbwerken an Rotationsmaschinen des Hoch- und Flachdruckes", Dissertation TH Darmstadt 1963

- /28/ WEDWEDJEW, E.M., "Überblick über die wissenschaftlich-technische Forschungsarbeit in der sowjetischen polygraphischen Industrie", Papier und Druck (Druck und Reproduktion) 9, 1-3 (1960)
- /29/ RUDER, R., "Fotoelektrische Farbschichtdickenbestimmung auf Farbwalzen", Papier und Druck (Druck und Reproduktion) 13, 33-36 (1964)
- /30/ GERTHSEN, Chr., "Physik", Kap. VIII (7. Aufl., Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1963)
- /31/ ALBRECHT, H. (Hrsg.), "Optische Strahlungsquellen", Kap 4: "Halogenglühlampen" verf. v. NEUMANN, G., (Lexika-Verlag, Grafenau/Württ., 1977)
- /32/ SCHMIDT, W. und FEUSTEL, O., "Optoelektronik" (Vogel-Verlag, 1975)
- /33/ BLEICHER, M., "Halbleiter-Optoelektronik" Kap. 3, (Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1976)
- /34/ PORTNER, W. und GRAICHEN, W., "A new method for measuring colours on printed materials at high web speeds", Vortrag auf der 12. IARIGAI-Konferenz, Paris, 1973)
- /35/ PORTNER, W. und GRAICHEN, W., "Dynamische Farbdichtemessung an Druckmaschinen", Papier und Druck (Druck und Verarbeitung) 25, 87-90 (1976)
- /36/ SCHOLZ, M., "Druckmaschinen auf der Leipziger Herbstmesse 1977", Papier und Druck (Druck und Verarbeitung) 26, 177-181 (1977)
- /37/ KLEIN, G., "Photoanalytische Untersuchungen über die Vorgänge im Walzenspalt", Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V., Heft 2/1977, S. 3-51
- /38/ CHRIST, W., "Berührungslose Temperaturmessung in Walzenfarbwerken", Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V., Heft 2/1970, S. 3-15
- /39/ GLÜCK, M., "Temperaturen in Walzenfarbwerken", Druck-Print 1 und 3 (1973)
- /40/ POHL, R.W., "Optik und Atomphysik", Kap. XI und XII (11. Aufl., Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1963)
- /41/ KORTUM, G., "Reflexionspektroskopie", Kap. II und III (Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1969)

- /42/ WALENSKI, W., "Marktübersicht Offsetdruckfarbe",
Deutscher Drucker 14(1), 5-16 (1978)
- /43/ SZABÓ, I., "Höhere Technische Mechanik", Kap. II
(4. Aufl., Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-
Heidelberg, 1964)
- /44/ DOBBELS, F. Private Mitteilungen März 1974
- /45/ SMITH, J.W., MALONEY, J.D., "Flow of Fluids between
Rotatin Rollers", Tappi Nov. 66 Vol 49
- /46/ DOBBELS, F., "Invloed van rheologische en thermische
effekten op de hydrodynamika van industrielle Pro-
cessen met roldoorgang", Dissertation 1977,
Kath. Uni Leuven
- /47/ DOUGLAS, LEWIS, SPAULL, "The investigation of the
dynamic visco-elastic functions of printing inks",
Rheol. Acta 10 (1971) S. 382-386
- /48/ PUTTRICH, H., Studienarbeit am IDD 1976, TH Darmstadt
- /49/ BECKER, E., "Technische Strömungslehre",
Teubner, Stuttgart, (1974)
- /50/ MOORE, D., "The friction and lubrication of elastomers"
Pergamon Press 1972